

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STAVEBNÁ
KATEDRA KONŠTRUKCIÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCA

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STAVEBNÁ
KATEDRA KONŠTRUKCIÍ

PRIESTOROVÉ VZPÍNADLO S PREDPÄTÝMI
ŤAHADLAMI AKO HLAVNÝ NOSNÝ PRVOK HÁL
VEĽKÝCH ROZPÄTÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCA

AUTOR PRÁCE: MGR. KATARÍNA KORČEKOVÁ
VEDÚCI PRÁCE: ING. MIROSLAV ROSMANIT, PH.D.

2016

VŠB – TECHNICAL UNIVERSITY OF OSTRAVA
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CONSTRUCTIONS

THE PRESTRESSED SPACE BEAM STRING
STRUCTURE AS THE MAIN SUPPORTING
ELEMENT OF LARGE SPAN HALLS

DIPLOMA THESIS

AUTHOR: MGR. KATARÍNA KORČEKOVÁ
SUPERVISOR: ING. MIROSLAV ROSMANIT, PH.D.

2016

Touto cestou by som chcela vyjadriť poďakovanie vedúcemu diplomovej práce Ing. Miroslavovi Rosmanitovi, Ph.D., za pomoc, ochotu a cenné rady poskytnuté na konzultáciách k tejto práci. Taktiež vďaka patrí Ing. Davidovi Mikoláškovi, Ph.D., Ing. Přemyslovi Pařenicovi a Ing. Anežke Jurčíkové, Ph.D., za konzultácie, technickú a softvérovú pomoc a za to, že mi umožnili využiť školskú výkonnú výpočtovú techniku na náročné statické výpočty. Poďakovanie ďalej patrí aj mojej rodine a priateľom za veľkú podporu a pochopenie.

Zadání diplomové práce

Student: **Mgr. Katarína Korčeková**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T037 Konstrukce staveb

Téma: **Prostorové vzpínadlo s předpjatými táhly jako hlavní nosný prvek hal
velkých rozpětí**
**The prestressed space beam string structure as the main supporting
element of large span halls**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

V rámci diplomové práce vypracujte:

1. Halové objekty velkých rozpětí, základní možnosti zastřešení těchto objektů.
2. Koncepce vzpínadla a možnost využití předpjatých ocelových konstrukcí ve stavební praxi. Vliv předpětí na stabilitu konstrukce.
3. Parametrická studie jednoduché předpjaté konstrukce se vzpínadly, zhodnocení výhod a nevýhod, možná konstrukční uspořádání, detaily.
4. Návrh konstrukce zastřešení velkorozponového objektu s využitím předpjaté ocelové konstrukce se vzpínadly.
5. Základní dispoziční a architektonické řešení zvolené varianty hangáru (výkresová dokumentace).
6. Statický výpočet rozhodujících nosných prvků a ztužení konstrukce.
7. Návrh a posouzení vybraných spojů.
8. Základní postup montáže navržených konstrukcí, technologický postup.

Seznam doporučené odborné literatury:

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí.
- [2] ČSN EN 1991: Zatížení konstrukcí – příslušné části.
- [3] ČSN EN 1993-1-1: Navrhování ocelových konstrukcí. Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.
- [4] Studnička, J., Macháček, J. Votlučka, L.: Ocelové konstrukce 20 – Pozemní stavby, Praha 1998
- [5] Wald, F., Sokol, S.: Navrhování stýčnic, Praha, 1998.
- [6] Marek, P.: Kovové konstrukce pozemních staveb, Praha, SNTL, 1985.
- [7] Odborné časopisy – Konstrukce, Stavitel, Structural Engineering, Stahlbau
- [8] Internet

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Rosmanit, Ph.D.**

Datum zadání: 29.02.2016

Datum odevzdání: 30.11.2016



doc. Ing. Antonín Lokaj, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prehlasujem, že:

- som bola oboznámená s tým, že na moju diplomovú prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zvlášť § 35 – použitie diela vrámci občianskych a náboženských obradov, vrámci školských predstavení a použiti diela školského a § 60 – školské dielo.
- beriem na vedomie, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (ďalej len VŠB-TUO) má právo nezárobkovo ku svojej vnútornej potrebe diplomovú prácu použiť (§ 35 ods. 3).
- súhlasím s tým, že jeden výtlačok diplomovej práce bude uložený v Ústrednej knižnici VŠB-TUO k prezenčnému nahliadnutiu. Súhlasím s tým, že údaje o diplomovej práci budú zverejnené v informačnom systéme VŠB-TUO.
- bolo dohodnuté, že s VŠB-TUO, v prípade záujmu z jej strany, uzavriem licenčnú zmluvu s oprávnením použiť dielo v rozsahu §12 ods. 4 autorského zákona.
- bolo dohodnuté, že použiť svoje dielo – diplomovú prácu, alebo poskytnúť licenciu k jej využitiu môžem len so súhlasom VŠB-TUO, ktorá je oprávnená v takomto prípade odo mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB-TUO na vytvorenie diela vynaložené (až do ich skutočnej výšky).
- beriem na vedomie, že odovzdaním svojej práce súhlasím so zverejnením svojej práce podľa zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o zmene a doplnení ďalších zákonov (zákon o vysokých školách), v znení neskorších predpisov, bez ohľadu na výsledok jej obhajoby.

V Ostrave dňa 30. 11. 2016

.....
podpis

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som celú diplomovú prácu vrátane príloh vypracovala samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a uviedla som všetky použité podklady a literatúru.

V Ostrave dňa 30. 11. 2016

.....
podpis

Abstrakt

Táto diplomová práca pojednáva o problematike využitia vzpínadla s predpätými ťahadlami ako hlavného nosného prvku zastrešenia hál veľkých rozpätí. V teoretickej časti práce je pozornosť zameraná na možnosti zastrešenia veľkorozponových objektov a na využitie predpätia v ocelových konštrukciách pozemných stavieb. V ďalšej časti sú urobené dve štúdie vplyvu predpätia na distribúciu vnútorných síl v jednotlivých prvkoch konštrukcie. Ako výpočtový model k ich spracovaniu poslúžila reálna konštrukcia zastrešenia WERK ARENY v Trinci. Záverečná časť je venovaná konkrétnemu návrhu nosnej konštrukcie zastrešenia s ukázkami posudkov vybraných prvkov, styčníc a spojov. K práci náleží aj základná výkresová dokumentácia.

Kľúčové slová: zastrešenie veľkorozponových hál, vzpínadlo, predpínanie, predpäté ocelové ťahadlo, systém predpätých ťahadiel Macalloy

Abstract

This diploma thesis deals with usage of a beam string structure with prestressed steel rods as the main supporting element of roofing structures of large span halls. In the theoretical part the main attention is focused on construction possibilities of roofing structures of large span objects as well as on usage of prestressing in steel structures of building constructions. Next part is dedicated to two parametrical case studies on impact of prestressing reflected in distribution of internal forces in particular members of the structure. The calculation model of the construction was designed with respect to the real roofing structure of the WERK ARENA in Trinec. The last part of this thesis contains the design of the main supporting members of the roofing structure with some examples of capacity checks of selected members and joints. Basic drawing documentation can be found in the attachment.

Key words: roofing structure of large span halls, beam string structure, prestressing, prestressed steel rod, Macalloy prestressed rod system

Obsah

Zoznam použitého značenia	10
Úvod	13
1 Halové objekty veľkých rozpätí, základné možnosti zastrešenia týchto objektov	15
1.1 Konštrukcie z tuhých prvkov	16
1.1.1 Rovinné konštrukcie	16
1.1.2 Priestorové konštrukcie	17
1.2 Visuté konštrukcie	19
1.2.1 Vlákňové konštrukcie	20
1.2.2 Membránové konštrukcie	22
1.3 Zavesené konštrukcie	23
1.3.1 Zavesené tuhé konštrukcie	23
1.3.2 Zavesené visuté konštrukcie	24
1.4 Pneumatické konštrukcie s lanami	25
2 Predpäté oceľové konštrukcie v stavebnej praxi	26
2.1 Podstata predpätia a jeho využitie v oceľových konštrukciách	26
2.1.1 Rozšírenie pružnej oblasti	27
2.1.2 Redistribúcia vnútorných síl	27
2.1.3 Zlepšenie stabilitných pomerov	27
2.1.4 Zlepšenie odolnosti proti únave	28
2.1.5 Zmenšenie deformovateľnosti konštrukcie	28
2.1.6 Použitie vysokopevnostných ťahadiel na predpínanie	29
2.2 Vybrané typy predpätých oceľových konštrukcií	30
2.2.1 Konštrukcie z dvoch častí	30
2.2.2 Predpäté lanové sústavy	36
3 Vplyv predpätia na správanie sa konštrukcie	39
3.1 Analýza časti priehradovej konštrukcie s predpätými stužidlami	39
3.2 Predpätie v programe SCIA Engineer 16.1	40
4 Parametrická štúdia vplyvu predpätia na rozloženie vnútorných síl v konštrukcii	45
4.1 Motivácia	45
4.1.1 Reálna konštrukcia zastrešenia WERK ARENY v Třinci	45
4.2 Pôsobenie predpätia v rovinnom väzníku	46
4.3 Pôsobenie predpätia v priestorovej konštrukcii	52

4.3.1	Demonštrácia úspory materiálu	60
5	Návrh konštrukcie zastrešenia veľkorozponového objektu s využitím predpätej ocelevej konštrukcie so vzpínadlami	61
5.1	Model navrhnutej konštrukcie	61
5.2	Výpočet zaťaženia konštrukcie	63
5.2.1	Stále zaťaženie	63
5.2.2	Úžitkové zaťaženie	64
5.2.3	Zaťaženie snehom	64
5.2.4	Zaťaženie vetrom	66
5.2.5	Zaťaženie teplotou	68
5.2.6	Predpätie	69
5.3	Kombinácie zaťaženia	69
5.4	Posúdenie únosnosti prvkov	70
5.4.1	Posúdenie prútov v ťahu a vzpernom tlaku	70
5.4.2	Posúdenie únosnosti horného pásu na kombináciu tlaku a ohybu . .	72
5.4.3	Posúdenie únosnosti ťahadiel	73
5.5	Návrh a posúdenie vybraných spojov a styčníc	73
5.5.1	Posúdenie styčníka dolného pásu	74
5.5.2	Posúdenie montážneho styku horného pásu – prípoj čelnou doskou .	78
5.5.3	Posúdenie čapového spoja na styku dvoch ťahadiel	79
6	Hlavné body montáže	81
	Záver	83
	Zoznam použitej literatúry	85
	Zoznam príloh	88

Zoznam použitého značenia

A	plocha prierezu
A_{nt}	plocha prierezu namáhaná ťahom
A_{nv}	plocha prierezu namáhaná šmykom
A_s	plocha prierezu skrutky
A_{net}	plocha prierezu oslabená otvormi pre skrutky
C_e	súčiniteľ expozície
C_{my}, C_{mz}	súčinitele ekvivalentného konštantného momentu
C_t	teplotný súčiniteľ
E	modul pružnosti v ťahu a tlaku
$F_{b,Rd}$	návrhová únosnosť skrutky v otláčení
$F_{v,Rd}$	návrhová únosnosť jednostrížnej skrutky v strihu
G_k	charakteristická hodnota stáleho uzlového zaťaženia
I_v	intenzita turbulencie
I_y	moment zotrvačnosti k osi $y-y$
L	dĺžka zvaru
L_{cr}	vzperná dĺžka
L_{syst}	systémová dĺžka prúta
M_c	ohybový moment plnej plastickej únosnosti náhradného T-profilu
$M_{pl,Rd}$	návrhový plastický ohybový moment únosnosti prierezu
M_{Rk}	charakteristická únosnosť prierezu v ohybe
$M_{y,Ed}, M_{z,Ed}$	návrhový ohybový moment k osi $y-y$, resp. $z-z$
$M_{y,Rk}, M_{z,Rk}$	charakteristická únosnosť prierezu v ohybe k osi $y-y$, resp. $z-z$
$N_{b,Rd}$	návrhová únosnosť prierezu vo vzpernom tlaku
N_{Ed}	návrhové zaťaženie prierezu osovou silou
$N_{p,Ed}$	návrhová sila v páse bez vplyvu medzipásových prútov
$N_{pl,Rd}$	návrhová plastická únosnosť plného prierezu v ťahu
N_{Rk}	charakteristická únosnosť prierezu v osovom tlaku
$N_{t,Rd}$	návrhová únosnosť prierezu v ťahu
$N_{u,Rd}$	návrhová únosnosť oslabeného prierezu v ťahu
Q_k	charakteristická hodnota premenného uzlového zaťaženie
T_{min}, T_{max}	minimálna, resp. maximálna teplota vzduchu tieni
T_0	východzia teplota konštrukcie
$V_{eff,Rd}$	únosnosť prierezu pri vrthnutí skupiny skrutiiek
$W_{el,y}, W_{pl,y}$	elastický, resp. plastický prierezový modul k osi y

a	účinná hrúbka kútového zvaru
c_f	súčiniteľ sily
c_o	súčiniteľ orografie
c_{pi}, c_{pe}	súčiniteľ vnútorného, resp. vonkajšieho tlaku vetra
c_r	súčiniteľ drsnosti terénu
d	priemer skrutky
d_0	priemer otvoru pre skrutku
f	vzopätie
f_u	medza pevnosti ocele
f_{ub}	medza pevnosti skrutky
$f_{vw,d}$	návrhová pevnosť zvaru v šmyku
f_y	medza klízu ocele
g_k	charakteristická hodnota stáleho spojitého zaťaženia
i_y	polomer zotrvačnosti k osi y
k_g, k_p, n_p, γ	súčinitele pri výpočte únosnosti kruhovej rúrky
k_I	súčiniteľ turbulencie
k_r	súčiniteľ terénu
$k_{yy}, k_{yz}, k_{zz}, k_{zy}$	interakčné súčinitele
q_k	charakteristická hodnota premenného spojitého zaťaženie
q_p	maximálny dynamický tlak
s_k	zaťaženie snehom na zemi
t	návrhová hrúbka oceľového plechu
t_e	minimálna hrúbka plechu dosky, pri ktorej nedochádza k páčeniu
v_b	základná rýchlosť vetra
v_m	stredná rýchlosť vetra
z_e	referenčná výška
α	súčiniteľ imperfekcie pre príslušnú krivku vzpernosti
β_w	redukčný súčiniteľ pri posudzovaní únosnosti zvarov
γ_{M_0}	súčiniteľ spoľahlivosti únosnosti prierezu ktorejkoľvek triedy
γ_{M_1}	súčiniteľ spoľahlivosti únosnosti prierezu pri posudzovaní stability prútov
γ_{M_2}	súčiniteľ spoľahlivosti únosnosti oslabeného prierezu v ťahu a pre skrutky
γ_{M_5}	súčiniteľ spoľahlivosti únosnosti kruhového prierezu
γ_p	súčiniteľ vplyvu zväčšenia sily od páčenia
ΔT_N	rovnomerná zložka teploty

θ	uhol medzi dvomi prútmi
λ	štíhlosť prúta
$\bar{\lambda}$	pomerná štíhlosť prúta
μ	redukčný súčiniteľ priestorových styčníc
μ_3	tvarové súčinitele zaťaženia snehom
$\sigma_{p,Ed}$	napätie v páse
ϕ	pomocný súčiniteľ pre výpočet súčiniteľa vzpernosti χ
χ	súčiniteľ vzpernosti pre príslušný spôsob vybočenia
χ_{LT}	súčiniteľ klopenia

Úvod

Predmetom tejto diplomovej práce je problematika vzpínadla s predpätými ťahadlami ako hlavného nosného prvku veľkorozponových hál. V predpínaných oceľových konštrukciách sa často výhodne kombinuje práve použitie vzpínadla s vysokopevnostnými ťahadlami schopnými bezpečne preniesť dodatočne vnášané napätie, čo má za následok pozitívny vplyv na rozloženie vnútorných síl v ostatných prvkoch konštrukcie. Výhodnosť využitia predpätia pri realizácii oceľových konštrukcií nadobúda význam pri objektoch väčších rozpätí, kde použitie bežných konštrukčných postupov by bolo buď nereálne, ekonomicky nevýhodné, alebo z hľadiska funkčnosti a estetiky neprípustné.

Motiváciou k spracovaniu tejto témy bol fakt, že hoci predpínanie oceľových konštrukcií pozemných stavieb v súčasnosti nie je žiadnou novinkou, je zatiaľ iba málo firiem v Českej republike, ktoré tento fenomén vo svojej projekcii a následnej realizácii využívajú. Takou firmou je napríklad spoločnosť Excon, a.s. so sídlom v Prahe. Práve táto firma stojí za návrhom takých projektov, ako sú napríklad zastrešenia O₂ Areny v Prahe alebo WERK ARENY v Třinci, unikátne zastrešenie stanice metra Střížkov v Prahe, hangár na letisku v Mošnově, či odbavovacia hala terminálu letiska M. R. Štefánika v Bratislave. A to všetko s využitím predpínaných oceľových ťahadiel.

V teoretickej časti tejto práce je preto prvá kapitola zameraná na možnosti zastrešenia veľkorozponových objektov a charakteristiku ich konštrukčných systémov. Ku každému typu sú uvedené realizované príklady.

Druhá kapitola pojednáva o predpätých konštrukciách využívaných v stavebnej praxi. Pozornosť je pritom zameraná na podstatu a výhody predpínania oceľových konštrukcií, na spôsoby vnášania predpätia a celkové dôsledky jeho použitia. Druhú časť kapitoly tvorí prehľad vybraných typov predpätých konštrukcií s ich stručnou charakteristikou.

Praktická časť práce začína treťou kapitolou. Tá je venovaná analýze časti priehradovej konštrukcie s predpätými stužidlami s cieľom zistiť, ako sa mení správanie konštrukcie od vnášaného predpätia. Súčasťou tejto kapitoly je aj stať venovaná problematike zadávania a vyhodnocovania počiatočného predpätia v programe SCIA Engineer 16.1.

Vo štvrtej kapitole sú zhrnuté výsledky dvoch štúdií vplyvu predpätia na prerozdelenie vnútorných síl v konštrukcii. Jedna štúdia sa zaoberá čisto rovinným prípadom priehradového väzníka s predpätým oceľovým ťahadlom, v druhej štúdii je tento väzník zakomponovaný do priestorového modelu konštrukcie. A hoci sú v tomto prípade opäť použité rovinné vzpínadlá, ukáže sa, že predpätie ich ťahadiel má vplyv na všetky prvky celej priestorovej konštrukcie.

Na základe poznatkov získaných z predchádzajúcich štúdií je v piatej kapitole urobený konkrétny návrh zastrešenia veľkorozponového objektu s využitím predpätých vzpínadiel. Inšpiráciou pre výber typu konštrukcie bolo zastrešenie WERK ARENY v Třinci. Táto kapitola ďalej obsahuje zjednodušený výpočet zaťaženia na navrhnutú konštrukciu, vý-

počet návrhových síl a ukážky posúdenia jednotlivý prútov a vybraných styčnícov podľa súčasne platných noriem.

V šiestej kapitole je uvedený zjednodušený technologický proces výroby a postup montáže konštrukcie.

Súčasťou práce je aj základná projektová dokumentácia navrhutej konštrukcie, obsahujúca prehľadné výkresy nosnej konštrukcie a detaily vybraných styčnícov.

1 Halové objekty veľkých rozpätí, základné možnosti zastrešenia týchto objektov

Halové stavby sú jednopodlažné budovy, ktoré slúžia ako priemyslové alebo poľnohospodárske prevádzky, garáže, opravovne, sklady, laboratória a objekty pre občianske účely. Konštrukčné riešenie je zásadne podriadené požiadavkám prevádzky s výrazným zreteľom na kvalitu vnútorného prostredia (osvetlenie, vetranie) [17].

Haly veľkých rozpätí majú podobný rozmanitý účel použitia a sú charakterizované zastrešením rozsiahlych plôch bez rušivého vplyvu väčšieho či menšieho počtu medziľahlých podpôr. Najčastejšie sa uplatňujú ako športové stavby, haly a kryté priestranstvá pre výstavné účely, spoločenské a kultúrne centrá, veľké garáže apod. Pre opravy lietadiel a ich prípravu k letom slúžia hangáre. Tie vyžadujú, okrem voľného vnútorného priestoru, prístup aspoň z jednej strany voľne otvárateľnými vrátami, ktoré vylučujú prítomnosť obvodových stĺpov.

Napriek určitým zvláštnostiam môžeme do tejto kategórie stavieb zaradiť aj zastrešenia tribún športových štadiónov. Podobné základné konštrukčné rysy majú divákovi poskytnúť primeraný komfort, ale zároveň nesmú rušiť výhľad na športovisko [13].

Základnou funkciou nosnej konštrukcie halových objektov je vytvorenie nosnej kostry pre strešné a prípadne aj stenové opláštenie, chrániace vnútorný priestor pred klimatickými vplyvmi. V mnohých prípadoch objektov (najmä výrobných a skladovacích) nosná konštrukcia slúži taktiež k vytvoreniu podpôr pre technologické zariadenia, najmä pre žeriavy. S nárastom rozpätia sa rozhodujúcim činiteľom stáva návrh strešnej konštrukcie prenášajúcej príslušné zaťaženia pôsobiace vo zvislom smere (vlastná tiaž konštrukcie, sneh), alebo v smere normály k ploche strechy (vietor). Spôsob ich prenesenia určuje základnú charakteristiku celého nosného systému. Naopak, zachytenie vodorovného zaťaženia možno zaistiť bežnými spôsobmi, nakoľko veľkorozponové objekty sú spravidla relatívne nízke.

Na dosiahnutie čo najhospodárnejšieho návrhu konštrukcie sa okrem iného kladie dôraz na minimalizáciu zaťaženia, čoho dôsledkom je časté využívanie ľahkých strešných plášťov. Hoci primárne bývajú drahšie a náročnejšie, s narastajúcim rozpätím sa výrazne prejavuje úspora na hmotnosti nosnej konštrukcie. Tento trend vyústil až do využitia strešného plášťa ako funkčnej časti nosnej konštrukcie, alebo dokonca ako hlavného nosného prvku (napr. membrána) [13]. V súčasnej dobe však ekonomickosť návrhu objektov veľkých rozpätí v istej miere ustupuje do úzadia pred architektonickou koncepciou a prevádzkovo-dispozičnými požiadavkami týchto stavieb, nakoľko bývajú výraznými architektonickými a urbanistickými dominantami svojho okolia (napr. zastrešenie olympijského komplexu v Mníchove) [14].

Klasifikácia objektov veľkých rozpätí

U veľkorozponových objektov existuje široká škála používaných konštrukčných systémov. Ich zatriedenie sa preto môže zakladať na rôznych hľadiskách: statický systém, konštrukčné prevedenie, tvar strešnej plochy, tvar pôdorysu a pod. V klasifikácii od Studničky a Votlučky [17] je ako základné hľadisko uvažované statické pôsobenie hlavných častí nosnej konštrukcie. Podľa toho rozlišujeme:

- *konštrukcie z tuhých prvkov,*
- *zavesené konštrukcie,*
- *visuté konštrukcie,*
- *pneumatické konštrukcie kotvené lanami.*

Je zrejmé, že spotreba materiálu sa pri tomto delení znižuje od tuhých konštrukcií po visuté. Naopak sa ale stupňuje náročnosť na podpory spôsobená nárastom vodorovných reakcií. Preto systémy s väčším namáhaním podpôr budú ekonomickejšie iba tam, kde úspora materiálu na zastrešenie preváži zvýšené náklady na podperné konštrukcie, čo obyčajne nastáva v prípadoch zvlášť veľkých rozpätí.

Iná klasifikácia hál veľkých rozpätí berie do úvahy spolupôsobenie jednotlivých častí konštrukcie a rozlišuje:

- *rovinné konštrukcie,*
- *priestorové konštrukcie.*

Hlavné nosné prvky rovinných konštrukcií sú usporiadané do výrazných samostatných častí zabudovaných vo zvislých rovinách. Tieto časti medzi sebou navzájom nespôsobujú a prenášajú iba zaťaženia pôsobiace vo svojej rovine. Zabezpečenie priestorovej tuhosti konštrukcie ako celku sa robí obdobne ako v prípade bežných priemyselných hál – sústavou stúdiel [13].

Protikladom toho priestorové konštrukcie pozostávajú zo vzájomne spolupôsobiacich prvkov neležiacich v jednej rovine a na prenášaní zaťaženia sa podieľajú všetky prvky konštrukcie. Oproti rovinným konštrukciám majú priestorové konštrukcie výhodu v lepšom využití materiálu, väčšej tuhosti, rezerve únosnosti, schopnosti lepšie odolávať nepravidelným zaťaženiam, sú vzhľadovo atraktívnejšie a umožňujú väčšiu architektonickú variabilitu. Z druhej strany, priestorové konštrukcie bývajú zložitejšie z hľadiska návrhu a zároveň prácnejšie z hľadiska výroby a montáže [13].

1.1 Konštrukcie z tuhých prvkov

1.1.1 Rovinné konštrukcie

Na základe statického hľadiska rozlišujeme tieto sústavy:

- *nosníkové (trámové)* – kde zvislé zaťaženie vyvoláva iba zvislé reakcie,
- *rámové* – charakteristické je priaznivejšie rozloženie momentov a vznik vodorovných reakcií,

- *oblúkové* – vodorovné reakcie sú výrazne väčšie, ale zmenšujú sa momenty a prevládajú osové sily.

Triedenie sústav v tomto poradí zároveň postihuje vhodnosť využitia tuhých rovinných konštrukcií pri zväčšovaní rozpätia [13].

Najmenej používaným typom nosníkov pre objekty veľkých rozpätí sú *plnostenné nosníky*. Ich nevýhodou je veľká spotreba materiálu v dôsledku veľkých ohybových momentov. Ako príklad použitia môžeme spomenúť zastrešenie odbavovacej haly hlavnej železničnej stanice v Prahe (2,45 m vysoké nosníky sú umiestnené po 4,5 m na rozpätie 15,5 m), alebo strechu tribúny štadiónu vo Verone (vyloženie strešnej konzoly z plnostenných nosníkov je 30 m).

Opačným prípadom sú *priehradové nosníky*. Pre svoju výrobnú a konštrukčnú jednoduchosť sa uplatňujú pri zastrešení objektov rozpätí okolo 100 m, v prípade spojených nosníkov aj na väčšie vzdialenosti. V porovnaní s inými systémami (zavesené, visuté konštrukcie) sú však materiálovo náročnejšie. Ďalšou ich nevýhodou je relatívne veľká konštrukčná výška, preto sa v novších stavbách umiestňujú nad strešnú rovinu.

Príkladom z blízkeho okolia je viacúčelová hala Ostravar Aréna v Ostrave-Vítkoviciach s hlavnými priehradovými nosníkmi rozpätia 100 m z ocele S690, ktoré sú uložené na betónových vežiach pomocou hrncových mostných ložísk.

Ďalším tradičným typom zastrešení objektov veľkých rozpätí sú *rámové konštrukcie* – plnostenné i priehradové. Estetiku týchto konštrukcií často dotvára premenná výška prierezov. Doposiaľ najväčšie realizované rámy s priehradovou priečľou presahujú rozpätie 100 m. Napríklad hangár na letisku Charlesa de Gaulla v Paríži tvoria dva dvojklbové rámy dĺžky 82,3 m spojené železobetónovou dielenskou budovou. Rámy sú od seba vzdialené 14,25 m a celková plocha zastrešenia je $201,3 \times 131$ m.

Rovinné oblúky sa používajú menej, prednosť sa dáva modernejším priestorovým sústavám. Horizontálne reakcie oblúkov sa zachytávajú ťahadlami v úrovni strechy alebo základov. Príkladom môže byť priehradový oblúk s rozpätím 300 m ako hlavný nosník zastrešenia tribún na olympijskom štadióne v Sydney v Austrálii [17].

1.1.2 Priestorové konštrukcie

Prvú skupinu priestorových systémov tvoria *rošty* – konštrukcie zo vzájomne krížených nosníkov, najčastejšie priehradových, pretože plnostenné sú málo tuhé. Podľa usporiadania nosníkov rozlišujeme rošty *dvojsmerné* – pravouhlé alebo diagonálne, *trojsmerné* či *viacsmerné*. Dvojsmerné rošty sú vo svojej rovine málo tuhé, preto musia byť doplnené stužidlami. Ako príklad môžeme uviesť zastrešenie tribúny futbalového štadióna San Siro v Miláne, kde oceľový rošt je tvorený 9,5 m vysokými priehradovými nosníkmi s rozpätím 205 a 148,6 m. Previsnutý koniec nad tribúnou je dlhý 45,5 m.

Priestorové pôsobenie dvoch oblúkov ležiacich v šikmých rovinách sa väčšinou dosahuje vzájomným spojením ich vrcholov. Tento systém môžeme nájsť napríklad na zimnom

štadióne v Prahe, kde vzájomné opieranie sa oblúkov zlepšuje ich stabilitu proti vybočeniu z roviny oblúkov a zvyšuje tuhosť celej konštrukcie.

Plnostenné priestorové sústavy z oceľového plechu sa pre strechy veľkých rozpätí používajú iba zriedka. Takto je zastrešená športová hala na Výstavisku v Prahe. Škrupina hrúbky 4 mm má rozpätie 64 m, vzopätie 17 m a dĺžku 96 m. Stabilita škrupiny ako celku je zaistená oblúkovými rebrami uzavretého prierezu vzájomne vzdialenými 16 m.

Naopak, priestorové prútové sústavy sú veľmi vhodné pre veľkorozponové konštrukcie. Najčastejším stavebným prvkom týchto konštrukcií, ktoré sú prevažne namáhané iba osovými silami, sú rúrkové prierezy, pretože majú vo všetkých smeroch rovnaké vlastnosti. Zložitou úlohou ale býva výroba a montáž styčníc, v ktorých sa stretávajú prúty neležiace v jednej rovine. Prúty z rúrok sa väčšinou stykujú prostredníctvom guľových styčníc zvarovaných z dutých pologúľ vylišaných z plechu [13].

Ďalším typom priestorových sústav sú tzv. *priehradové dosky*. Sú to rovinné formy priehradových prútových konštrukcií tvorené dvoj- i viacvrstvovými sústavami tak, že styčnice jednotlivých vrstiev neležia nad sebou, ale sú prepojené v šikmých rovinách diagonálami. Najrozšírenejším typom sú dvojsmerné pravouhlé siete s rovnobežným alebo diagonálnym usporiadaním pásových prútov vzhľadom k okrajom dosky. Jednu vrstvu pritom možno navrhnuť redukovanú.

Výhodou priehradových dosiek je veľká flexibilita vzhľadom k rozmiestneniu podpôr (vo väčšine prípadov stačí podopretie v rohoch). Okrem toho sa dobre prispôbujú nepravidelným pôdorysom, či zmene výškových úrovní. Naopak, nevýhodou okrem zložitosti detailov je aj vysoká spotreba materiálu. Tieto systémy sú tvorené veľkým počtom prvkov, ktoré i v prípade minimálneho namáhania nesmú mať navrhnuté menšie dimenzie ako je konštrukčne vhodné.

Príklad využitia priehradovej dosky môžeme nájsť na streche zimného štadióna v Brne a na desiatkach iných objektov v ČR [17].

Zastrešenie zimného štadióna v Prostějove reprezentuje veľmi ekonomickú priestorovú konštrukciu dvojvrstvovej *lamelovej klenby*. Tá je tvorená sústavou krížiacich sa štíhlych dvojklbových oblúkov zo spojených lamiel, riešených ako priehradové alebo Vierendeelové nosníky.

Priestorovou prútovou konštrukciou je aj O₂ Arena (predtým Sazka Arena) v Prahe. Nosná konštrukcia v tvare guľového vrchlíka s priemerom 135 m a vzopätím 9 m je tvorená priestorovým vzpínadlom z priehradového väzníka s ťahadlom. Celkovo ich je 36 a zbiehajú sa do centrálného prstenca tvoreného priehradovým valcom s priemerom 18 m a výškou 12,3 m. Oblúkové priehradové rovinné väzníky sú uložené na oceľových stĺpoch a betónovej konštrukcii haly v osovej vzdialenosti 4 m. Stúžidlá v sústredných kružniciach spolupôsobia s väzníkami a spolu so zavetrovaním strešnej roviny zaisťujú celkovú stabilitu strechy [17].

Konštrukcia strechy je zváraná z rúrok z ocele S355, ťahadlá sú z ocele S460, majú priemer 100 mm a môžu sa napínať skrutkovými napínákmi. Až na ťahadlá, dodané anglic-

kou firmou Macalloy, celú nosnú konštrukciu strechy dodávala spoločnosť Hutní montáže Ostrava [14].

Tvarovo veľmi podobnou konštrukciou je *kopula*. Jej styčníky ležia na rotačnej ploche dvojitej krivosti. U dvojvrstvových lamelových a roštových kopúl sa prúty konštruujú z priehradových alebo Vierendeelových nosníkov. Najväčšie dvojvrstvové kopule nachádzame v USA ako zastrešenia veľkých športových hál, napr. hala Astrodome v Houstone, postavená v roku 1968 pre 60 000 divákov, alebo hala Superdome v meste New Orleans. Doposiaľ najväčšou zrealizovanou kopulou s priemerom 266 m je strecha haly Wayne County Stadium v Detroite. Ďalšiu známu kopulovitú strechu nájdeme na Globen Arene v Štokholme. Konštrukcia je v tvare gule s priemerom 110 m a výškou 85,4 m. Hornú časť haly tvorí priestorová priehradová dvojvrstvová konštrukcia MERO výšky 2,1 m [14].

Architektonicky veľmi zaujímavou konštrukciou tohto typu je obrovský skleník Eden pri St. Austell v Anglicku. Pozostáva z dvoch reťazcov štyroch vnútorne spojených oceľových guľových kopúl zasadených do starej tehelne. Kopule majú priemer od 37 do 124 m a výšku až 40 m. Aj v tomto prípade bol použitý systém MERO s trojbokou šesťuholníkovou sieťou, kde diagonály medzi vonkajšou a vnútornou guľou vytvárajú tetrahedrony. Výpočty tejto konštrukcie boli založené na teórii druhého rádu [17].

Zvláštnym nekatégorizovateľným objektom je konštrukcia najväčšieho pohyblivého zastrešenia na svete – hala Sky Dome v Toronte. Strešnú konštrukciu tvoria dve priestorové priehradové valcové a dve guľové škrupiny. Výška haly 86 m umožňuje prevádzkovať všetky druhy športov. Kapacita haly je 54 000 divákov pri baseballe [14].

1.2 Visuté konštrukcie

Základom visutých konštrukcií sú hlavne laná a plech, teda ohybovo netuhé nosné prvky, ktoré sú schopné prenášať iba ťahové namáhania. Tieto prvky sú väčšinou rozhodujúce pre tvar strechy a tvoria podpory pre strešný plášť, prípadne ho samé vytvárajú. V niektorých prípadoch je konštrukcia strechy na ne zavesená, čo znamená, že na rozdiel od ťahadiel sú priečne zaťažené aj medzi koncovými bodmi.

Správanie a vlastnosti visutých konštrukcií sú značne odlišné od konštrukcií z tuhých prvkov. Oproti nim majú dôležité výhody, medzi ktorými je najvýraznejšia malá spotreba materiálu. Tá je daná ťahovým namáhaním, ktoré je po dĺžke prvku iba málo premenné, a možným využitím materiálov vysokých pevností. Veľká tvarová rozmanitosť zas umožňuje nekonvenčné architektonické riešenia.

Problematickou stránkou visutých konštrukcií sú veľké deformácie vyplývajúce hlavne z tvarovej lability. Je známe, že ohybovo netuhá konštrukcia zaujíma vždy tvar korešpondujúci s výslednicovou čiarou zaťaženia. Prejavuje sa to zmenou priechybov pri zmene rozloženia zaťaženia. V prípade, že prevláda vztlaková sila vetra, hrozí naddvihnutie ľahkej konštrukcie. Preto sa kladú veľké požiadavky na kvalitu krytiny. Veľké vodorovné reakcie spôsobujú značné nároky na podpory, čím sa redukuje úspora na materiáli vlastnej stre-

chy. Preto sú visuté konštrukcie vhodnejšie pre veľké rozpätia, kde sa vysoké náklady na podpory kompenzujú lacným zastrešením.

Pôsobenie visutých konštrukcií závisí na prievisse. S jeho zmenšovaním rastie namáhanie samotnej konštrukcie i podpôr [13].

Z konštrukčného hľadiska môžeme visuté konštrukcie rozdeliť na *vláknové* a *membránové*.

1.2.1 Vláknové konštrukcie

Vláknové konštrukcie, alebo tiež nazývané *lanové strechy*, sú tvorené systémom ohybných vlákien, najčastejšie oceľových lán. Na elimináciu tvarovej lability vlákien a na zaistenie potrebných funkčných vlastností konštrukcie je nutné visuté strechy stabilizovať. Tvarová stabilizácia sa zaistuje buď aplikáciou veľkého stáleho zaťaženia vo forme ťažkého strešného pláštá, alebo predpätím pri použití krížiacich sa lán, ktoré sa napnú. Tým sa do konštrukcie vnášajú ďalšie sily, preto je veľmi dôležité stanoviť optimálnu veľkosť predpätia [13].

Vláknové konštrukcie môžeme ďalej rozdeliť na *rovinné* a *priestorové*. U rovinných systémov sú laná umiestnené vedľa seba a vytvárajú valcovú strechu nad obdĺžnikovým alebo lichobežníkovým pôdorysom. Každé lano sa kotví buď do samostatných podpôr, alebo do tuhých obvodových nosníkov, alebo dokonca do obvodových lán. Náklady na podpory klesajú u viacodňových objektov s vnútornými podporami, pretože osovú silu sú rovnaké ako pre lano v jednom poli.

V prípade jednovrstvových konštrukcií laná vytvárajú priamo plochu strechy. Tieto konštrukcie možno stabilizovať iba zaťažením. Navrhujú sa preto pre ne hlavne betónové monolitické či prefabrikované plášte. Odvodnenie sa zabezpečí pozdĺžnym sklonom od premennej výšky stien alebo premenným prievisom lán.

V prípade dvojvrstvových rovinných konštrukcií funguje spolupôsobenie dvoch vlákien vo zvislej rovine, zabezpečené spojovacími prostriedkami. Systém sa stabilizuje predpätím. Príklad dvojvrstvej konštrukcie nachádzame na zastrešení zimného štadióna Johanneshof v Štokholme s pôdorysnými rozmermi 83×118 m a s priemerom hlavných nosných lán 58 mm a predpínacích lán 48 mm. Za zmienku stojí aj zastrešenie zimného štadióna v Plzni. Strechu tvorí predpätá lanová konštrukcia s rozpätím 78,9 m, pozostávajúca z nosných a predpínacích lán, ktoré sú umiestnené v rovinách vzájomne posunutých o polovicu modulu. Spodné predpínacie laná ($2 \times \phi 40$ mm) sú s hornými nosnými lanami ($2 \times \phi 50$ mm) spojené hustou sieťou pozdĺžnych ťahadiel z pásovej ocele, čo zaistuje prenos predpätia do nosného lana [17].

Podľa usporiadania vlákien môžeme priestorové konštrukcie rozčleniť na:

- *radiálne usporiadané sústavy*,
- *lanové kopule*,
- *lanové siete*.

Systémy s *radiálnym usporiadaním lán* sa využívajú najmä na zastrešenie objektov s kruhovým pôdorysom, prípadne s oválnym. Po obvode sa lana kotvia do vonkajšieho

prstenca, ktorý je v prípade kruhového pôdorysu pri symetrickom zaťažení iba tlačný. Samotná strecha ako celok vyvodzuje na podpory iba zvislé reakcie a je preto ekonomická aj pre menšie rozpätia.

Problém u týchto konštrukcií nastáva v mieste kríženia väčšieho počtu lán v strede pôdorysu. Preto sa často uplatňuje rozloženie kríženia do viacerých bodov, napr. dvojicami rovnobežných lán, alebo sa navrhne vnútorný ťahaný prstenec, ktorý kríženie úplne eliminuje. Ďalšou nevýhodou týchto striech je odvodnenie stredom pôdorysu.

Dočasným príkladom radiálnej lanovej strechy bol pavilón USA zo svetovej výstavy v Bruseli 1958. Laná boli napnuté medzi vonkajším (92 m) tlačným prstencom, ktorý tvoril uzavretý priehradový nosník výšky 6 m, a vnútorným (20 m) ťahaným prstencom v podobe 8,5 m vysokého valca. Laná mali priemer 32–54 mm. Pavilón bol po výstave demontovaný a znovu postavený nikdy nebol [17].

Ekonomicky veľmi výhodnou konštrukciou na zastrešenie kruhových pôdorysov do priemeru 200 m sú lanové kopule, ktorých autorom je americký inžinier D. H. Geiger. Medzi obvodovým tlačným a vnútorným ťahaným prstencom sú radiálne rozmiestnené lanové väzníky bez dolného pásu, ktorý je nahradený sústrednými lanovými prstencami a diagonálami. Jedinými tuhými tlačnými prvkami lanového väzníka sú zvislice.

Montáž sa robí postupným napínaním diagonál, postupuje sa od vonkajšieho okraja smerom dovnútra – postupne sa naddvíhavajú lanové prstence a tým sa zdvíha kopula. Krytinu v tomto prípade tvorí tkanina nesená podružnou sieťou laniiek [13].

K najznámejším zrealizovaným lanovým kopulám patria haly pre olympijské hry 1988 v Soule, hala Suncoast Dome v St. Petersburgu na Floride a hala v Atlante, na výstavbu ktorej bol použitý zdokonalený systém Tenstar. Vylepšenie spočívalo v tom, že každý styčník horného povrchu kopule bol fixovaný tromi lanami, čo zvýšilo tuhosť strechy bez zvýšených nárokov na predpätie siete. Hala bola naprojektovaná pre 70 500 divákov pri americkom futbale. Tribúny sú železobetónové, po obvodu haly je taktiež železobetónový tlačný prstenec dutého prierezu s vonkajšími rozmermi 7,9×2,4 m a laná majú priemer 30–100 mm [14].

Posledným typom priestorových konštrukcií sú *lanové siete*. Lanové siete vytvárajú plochú nosnú konštrukciu strechy. Obvykle sú tvorené dvomi sústavami opačne zakrivených križujúcich sa vlákien, ktoré tvoria plochu dvojitej krivosti. Lanové siete vyvodzujú reakcie po celom obvode – kotvia sa do tuhých obvodových prvkov. Sú vhodné pre kruhové, oválne a im podobné pôdorysy. Stabilizácia sa dosahuje predpínaním. Vďaka tuhej sieti je možné použiť veľmi ľahkú krytinu. Ďalšou výhodou je tvarová rozmanitosť striech [13].

Prvá lanová sieť dvojitej krivosti bola realizovaná na hale v Raleigh (USA) už v roku 1952. Sieť je ukotvená do dvojice sklonených parabolických oblúkov. Pôdorysné rozmery konštrukcie sú 92×97 m [14]. Rovnaký typ strechy nachádzame na hale v Bratislave na Pasienkoch. Laná sú kotvené do betónových oblúkov korýtkového prierezu. Boli napínané predpínacími pištoľami. Nosné laná sú rozmiestnené v rasti po 1,8 m, krytinu nesie drôtené

pletivo s okami 100×100 mm, položené na laná. Samotnú krytinu tvorí sklená tkanina, sklená vata, cementový poter a lepenka [17].

1.2.2 Membránové konštrukcie

Namiesto vlákien, ktoré plnia iba nosnú funkciu a ktoré treba prekryvať krytinou, je možné na visutú konštrukciu použiť ťahané plošné prvky – membrány, ktoré zároveň plnia funkciu nosnú i funkciu krytiny. Membránové konštrukcie sú veľmi ekonomické, nakoľko z hľadiska pevnosti postačujú na rozpätia okolo 100 m plechy hrúbky 1,5–2 mm, pretože ťahové sily sú v nich veľmi priaznivo rozložené. Z konštrukčných dôvodov sa ale používajú plechy 4 až 6 mm hrubé.

Membránové strešné plášte sa najčastejšie stavajú nad kruhovými alebo symetrickými oválnymi pôdorysmi, ale nájdeme ich aj na objektoch obdĺžnikového tvaru. Plech sa kotví do obvodového prstenca, ktorý sa dimenzuje na prenesenie veľkých tlakových síl, ktorými sú výslednice membránových napätí v plášti v mieste ukotvenia. Vzhľadom na veľké ťahové namáhanie majú membrány veľké priehyby, na ktoré pri návrhu netreba zabudnúť. Značný vplyv na deformácie má aj teplota, ktorá dosahuje na strechách výrazné hodnoty. Nakoľko membrána nemá odolnosť proti tlaku vznikajúcemu pri prípadnom saní vetra na streche, býva stabilizovaná rebrami umiestnenými zospodu. Veľkú pozornosť treba zamerať na protikoróziu ochranu membrány ako zvonka, tak aj zvnútra haly. Montáž sa väčšinou nezaobíde bez strednej podpory prechádzajúcej otvorom lucerny lemovanej ťahaným prstencom [17].

Najväčšie doposiaľ postavené membránové strechy kryjú štadión Olympijskij a velodróm Krylatskoje v Moskve, postavené pri príležitosti olympijských hier v roku 1980 [14]. Prvý menovaný štadión má oválny pôdorys rozmerov 224×183 m a membránovú strechu z 5 mm hrubého plechu stabilizovanú radiálne vedenými 2,5 m vysokými priehradovými rebrami. Vonkajší obvodový prstenec má rozmery $5 \times 1,75$ m a tvorí ho oceľový uzavretý zváraný nosník, ktorý bol dodatočne vybetónovaný. Okrem radiálnych rebier je membrána vystužená aj rebrami kolmými na tie radiálne. Stredný prstenec má rozmery 30×24 m, je celooceľový a vystužený v oboch smeroch. Membrána pozostáva zo zvitkov plechu až 90 m dlhých a 10 m širokých, ktoré sú medzi sebou navzájom poprepájané vysokopevnostnými skrutkami. Obvodové stĺpy haly sú oceľové priehradové. Z prevádzkových dôvodov je vnútri štadióna umiestnená dvojica mohutných priehradových rámov, na ktoré je možné prichytiť výsuvnú akustickú stenu a rozdeliť tak halu na dva nezávislé priestory.

Druhá spomínaná strešná konštrukcia sa prezentuje netradičným tvarom strechy. 4 mm hrubé membrány sú upnuté vždy medzi dva sklonené oblúky prierezu 2×3 m. Spodné oblúky sú podopierané stĺpmi obvodovej steny, stojaté oblúky sú vzájomne prepojené priehradovým zavetrovaním s preskleným podhľadom. V smere spádu strechy membránu vystužujú rebrá 6×850 mm po 6 m a priečne tenkostenné U profily po 3 m. Pôdorysné rozmery haly sú 168×138 m. Do haly sa zmestí 15 000 divákov [13].

1.3 Zavesené konštrukcie

Charakteristickým znakom zavesených konštrukcií je použitie závesov (ťahadiel), ktoré vytvárajú dodatočné podpory nosnej konštrukcie a znižujú tak jej namáhanie a tým aj dimenzie prvkov. Zaťaženie z ťahadiel sa prenáša do hláv pilierov, z ktorých sa zvislá sila prenesie rovno do základov a vodorovná sila sa v prípade symetrického zaťaženia vyruší. Pri nesymetrickom zaťažení sa vodorovné účinky prenesú buď ohybovou tuhosťou pilierov, alebo sa ťahadlá ukotvia na druhej strane piliera do základov.

Ťahadlá sú zaťažené iba v koncových bodoch a preto ich môžu tvoriť ako tuhé prvky, tak aj ohybné vlákna (laná). Treba dbať na optimálne rozmiestnenie závesov, nakoľko tento fakt zásadne ovplyvňuje nielen priebeh napätí od namáhania nosnej konštrukcie, ale aj spotrebu materiálu. Samotná konštrukcia nesúca strešnú dosku môže byť z ohybovo tuhých prvkov aj visutá [13].

1.3.1 Zavesené tuhé konštrukcie

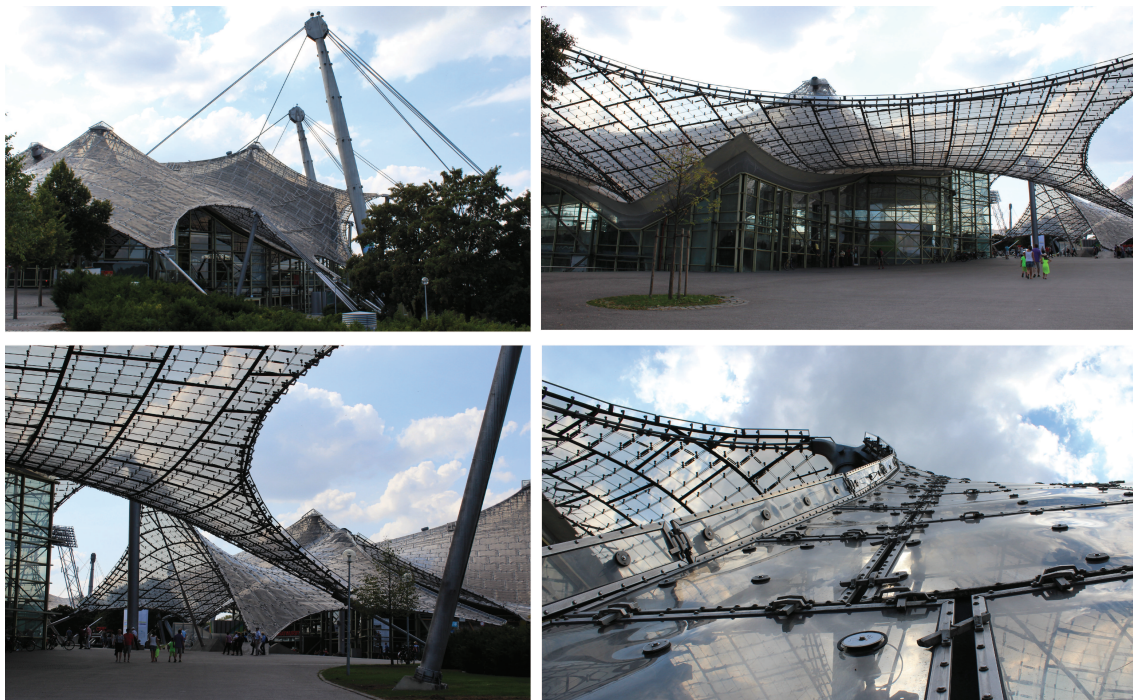
Zavesenie sa používa v kombinácii s rovinnými i priestorovými sústavami. Z rovinných sú to najmä nosníky alebo rámy, z priestorových rošty alebo priehradové dosky. Pritom ťahadlá môžu byť v kombinácii s rovinnou sústavou orientované priestorovo.

Častým prípadom zavesených konštrukcií sú hangáre. Pražský hangár v Ruzyni je príkladom využitia koncepcie zavesenia nosníkov kolmo otvor pre vráta. Hlavné plnostenné nosníky prierezu I sú na jednej strane kĺbovo uložené na železobetónovej konštrukcii priľahlých dielní, na druhom konci podperu nahrádza ťažko z rúrky zakotvenej cez piliere uzavretého prierezu do betónovej konštrukcie. Hlavné priečne väzby sú od seba vzdialené 12 m a celková dĺžka hangára je 213 m. Spolupôsobenie hlavných väzieb zabezpečujú spojené priehradové väznice. Na voľnom konci hlavných nosníkov je pre vedenie vrát a prenos vodorovných síl od vetra na vráta skonštruovaný priehradový skriňový prierez. Vedenie vrát umožňuje prieťah strechy ± 300 mm. V roku 2003 prešiel hangár generálnou rekonštrukciou, kedy stará ťažká železobetónová krytina bola vymenená za modernú strechu s nosným plášťom z trapezových plechov [17].

Najväčšiu zavesenú strechu na svete s rozpätím 300 m a vzopätím 50 m má Millenium Dome v Londýne, ktorý bol v rokoch 1996–1999 postavený k oslavám príchodu tretieho tisícročia. Neskôr bol dóm prestavaný na zábavné centrum a veľkokapacitný štadión. V súčasnosti objekt nesie názov *The O₂* a spolu s *O₂ Arénou* sa využíva na rôzne spoločenské, kultúrne a športové podujatia. Kopulovitú konštrukciu zastrešenia nesie dvanásť 95 m vysokých šikmo kotvených oceľových stĺpov. Materiál strechy je vyrobený zo sklenených vlákien potiahnutých teflónom [24].

1.3.2 Zavesené visuté konštrukcie

Zavesenie možno využiť aj pre zmenšenie voľného rozpätia visutých sústav. Nosnú konštrukciu strechy potom tvoria buď lanové siete alebo membrány, u ktorých možno využiť stabilizačné predpätie.



Obr. 1 Visuté strechy Olympiaparku v Mníchove

Jedny z najznámejších zavesených striech sa nachádzajú na objektoch postavených pre olympiádu 1972 v Mníchove. Na pylónoch vysokých až 80 m z kónických rúrok priemerov až 3,5 m sú uchytené laná, z ktorých je vyvesená lanová sieť krytá akrylátovými doskami. Nosné laná sú zložito vedené a kotvené do individuálne tvarovaných liatinových styčníc, ktorých tvar bol odvodený z geometrie statického priebehu síl. Dosky krytiny 3×3 m sú nesené podružným systémom oceľových laniiek uložených do štvorcovej siete 75×75 cm. Každá doska je kotvená do lanovej osnovy pomocou pružných chloroprenových tvaroviek, ktoré zároveň kompenzujú priehyb lán, zabezpečujú dilatáciu medzi jednotlivými doskami a plnia funkciu odvodnenia strechy [14].

Inú špeciálnu konštrukciu zavesených striech nachádzame na odbavovacom termináli Hadž na letisku v Džidde v Saudskej Arábii. Je to obrovský komplex striech kryjúcich pred slnkom davy pútnikov do Mekky. Celková zastrešená plocha rozmerov 315×700 m je tvorená malými vzdušnými zavesenými konštrukciami postavenými v module 45×45 m. Každý modul je tvorený látkovým stanom vyveseným za centrálny prstenec do štyroch okolitých pilierov z kónických oceľových rúr vždy dvojicou lán. Ďalšie štyri laná stabilizujú prstenec smerom dole. Látková membrána má lano prevlečené všetkými okrajmi a ďalších 32 radiálnych káblov, ktoré spájajú okrajové laná s prstencom. Materiál stanovvej krytiny

je zo sklolaminátu s povrchovým ošetrením teflónom. Vnútorne pylóny sú jednodriekové (kývne), okrajové pylóny dvojdielkové a rohové pylóny štvordriekové (votknuté) [17].

V USA je veľmi známa zavesená stanová konštrukcia letiska v Denveri. Zastrešená plocha má rozmery 90×300 m a celá strecha je nesená na 34 stĺpoch výšky 30 m.

1.4 Pneumatické konštrukcie s lanami

Pneumatické konštrukcie využívajú pretlak vnútri objektu krytého málo priepustnou textíliou k vynášaniu gravitačného zaťaženia. U veľkých stavieb je nutné látkový plášť stabilizovať oceľovými lanami a zmenšiť tak namáhanie tkaniny.

Doposiaľ najväčšou pneumatickou konštrukciou kotvenou lanami je hala vo Vancouveri z roku 1983. Do haly sa zmestí 60 000 divákov pri baseballe a jej pôdorysné rozmery sú 232×190 m. Oválny pôdorys lemujú stupňovité betónové tribúny, výška vnútri haly je 60 m. Strecha je tvorená tkaninou zo sklenených vlákien s teflónovým povlakom (životnosť 30 rokov), držaná pretlakom $0,3 \text{ kN/m}^2$ zo 16 kompresorov, každý s výkonom 75 kW. Vzhľadom na vykurovanie haly sa so zaťažením od snehu nepočíta, uvažuje sa len zaťaženie vetrom a vlastná tiaž. Laná majú priemer 80 mm a sú usporiadané v rozstupoch 12 m [13].

Ďalšie pneumatické konštrukcie štadiónov nachádzame v Detroite (Silverdome Pontiac) s pôdorysnými rozmermi 220×168 m alebo v Tokiu (Korakuen Air Dome) o rozmeroch 201×201 m.

Jednou z posledných realizovaných membránových pneumaticky predpätých konštrukcií je futbalový štadión Allianz Arena v Mníchove. Nosnú sieť tvoria duté oceľové tyče, do ktorých sú upevnené membrány z ETFE. Tento materiál je odolný voči požiaru, mechanickému poškodeniu a je samočistiaci [14].



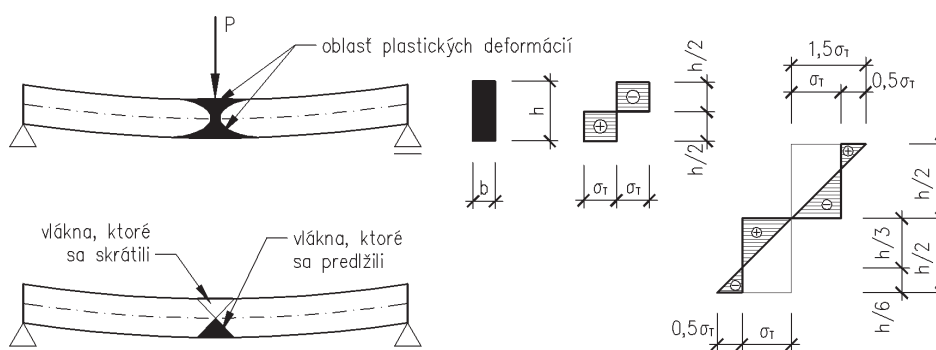
Obr. 2 Allianz Arena v Mníchove

2 Predpäté ocelové konštrukcie v stavebnej praxi

2.1 Podstata predpätia a jeho využitie v ocelových konštrukciách

Predpäté ocelové konštrukcie sú také, do ktorých sa v priebehu výroby, montáže alebo prevádzky (napr. pri zosilňovaní) zámerne vnášajú namáhania určitej veľkosti, zmyslu, prípadne časového pôsobenia. Predpätím sa rozumie namáhanie zámerne vnesené do konštrukcie mechanickými, technologickými alebo inými prostriedkami [10].

Predstavme si nosník ohýbaný do takej miery, že sa vytvorí plastický kĺb (obr. 3). Po odľahčení trvalo plasticke pretvorené vlákna bránia pružne napätým vláknám dosiahnuť svoju pôvodnú dĺžku, v dôsledku čoho vznikajú vlastné napätia. Ak takto zdeformovaný nosník po odľahčení opäť zaťažíme v tom istom zmysle a smere, ako predtým, veľkosť maximálnych napätí v krajných plasticke pretvorených vláknach sa bude znižovať o veľkosť počiatočných vlastných napätí. Z toho vyplýva, že vlastné napätia zväčšujú moment vnútorných síl, ktorý nosník dokáže prenášať pružne, čiže umožňujú rozšíriť oblasť pružného pôsobenia konštrukcie [10].



Obr. 3 Schéma vzniku vlastných napätí pri ohybe

Pri predpínaní ide v podstate o vytvorenie vlastných napätí bez toho, aby v konštrukcii vznikali plastické oblasti. Zámerne sa preto vytvárajú také počiatočné napätia, ktoré pri aplikácii zaťaženia priaznivo ovplyvňujú pôsobenie konštrukcie.

Hlavným cieľom predpínania je lepšie využitie materiálu, či už z pohľadu statických funkcií, alebo z pohľadu hospodárnosti návrhu. To sa dosahuje najmä:

- rozšírením pružnej oblasti,
- redistribúciou vnútorných síl,
- zlepšením stabilitných pomerov,
- zlepšením odolnosti proti únave,
- zmenšením deformovateľnosti konštrukcie,
- využitím materiálov s vysokou pevnosťou (napr. ako predpínacie ťahadlá).

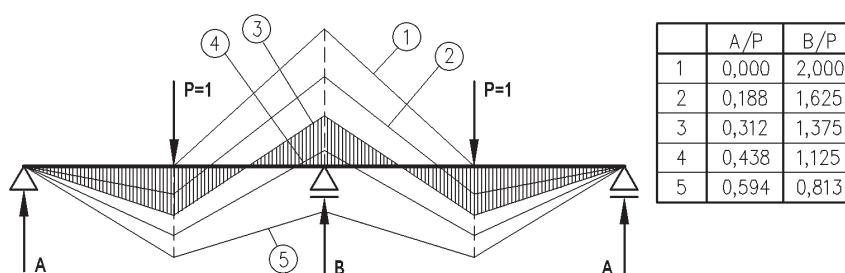
Uvedené spôsoby sa často navzájom prelínajú a dopĺňajú, avšak vždy je jeden z nich dominantný. V nasledujúcej časti si jednotlivé spôsoby v krátkosti predstavíme [10].

2.1.1 Rozšírenie pružnej oblasti

Rozšírenie oblasti pružného pôsobenia sa dosiahne tým, že sa v konštrukcii najprv vyvolá napätie od predpätia opačného znamienka než je to, ktoré bude vyvolané zaťažením v priebehu prevádzky. Takto predpätý prvok prenesie väčšie zaťaženie ako nepredpätý prvok. Predpätie sa pritom do prúta zavádza pomocou predpínacieho ťahadla z vysokopevnostného materiálu.

2.1.2 Redistribúcia vnútorných síl

Predpätím sa dá meniť veľkosť výsledných momentov alebo síl. V najviac namáhaných prvkoch sa vnútorné sily znižujú, zatiaľ čo v nevyužitých prierezoch sa zväčšujú. Princíp sa dá jednoducho vysvetliť na spojitom nosníku (obr. 4). Pri zmene výšky podpier vzniká predpínací ohybový moment, ktorý sa superponuje s momentom od vonkajšieho zaťaženia. Tak možno získať (v rámci možností) ľubovoľný priebeh ohybových momentov:



Obr. 4 Vplyv zvislého posunu podpier na veľkosť ohybového momentu a veľkosť reakcií [10]

Podobný princíp platí aj v prípade horizontálnych posunov podpier konštrukcií. Táto modifikácia sa najčastejšie používa v prípade rámových alebo oblúkových sústav.

V mostných konštrukciách možno pomocou priečne usporiadaného predpínacieho ťahadla dosiahnuť rovnomernejšie využitie nerovnako zaťažených hlavných nosníkov:



Obr. 5 Využitie predpätia v mostných konštrukciách

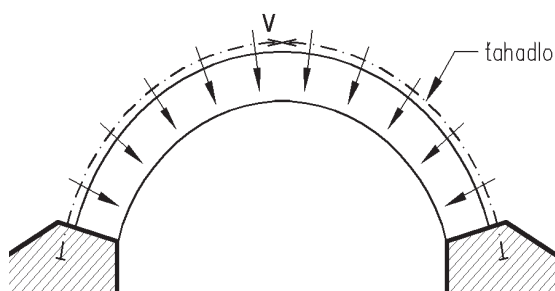
2.1.3 Zlepšenie stabilitných pomerov

Ako príklad na zlepšenie stabilitných pomerov prvku pomocou predpätia môžeme uviesť stabilizáciu oblúka predpätým ťahadlom. Ťahadlo napnuté z vonkajšej strany oblúka pôsobí ako priečne stále zaťaženie, čo stabilizuje tvar oblúka pri prípadnom jednostrannom náhodnom zaťažení. Prejavuje sa to v zmenšení odchýlky tlakovej čiary od strednice oblúka.

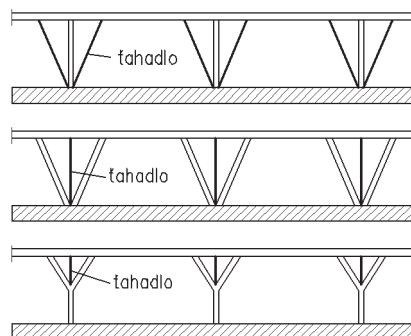
Všeobecne platí, že ťahadlo v miestach ukotvenia k predpínanému prútu vytvára pre daný prvok pružné podpory, čím skracuje jeho vzperné dĺžky. Ťahadlo pritom musí byť

s prvkom vhodne spojené, napr. pomocou diafragiem. Súčinitele vzpernosti pri rozumných vzdialenostiach diafragiem majú hodnoty blízke jednotke.

V prípade plnostenného nosníka s predpínacím ťahadlom pri ťahanom páse, ktorý je s ním posuvne spojený cez diafragmy, sa zvýši nielen tuhosť nosníka v krútení, ale aj jeho odolnosť proti sklopeniu [10].



Obr. 6 Oblúk stabilizovaný predpätým ťahadlom



Obr. 7 Spojitý nosník žeriavovej dráhy s využitím predpätého ťahadla

2.1.4 Zlepšenie odolnosti proti únavě

V dôsledku predpätia môže vznikať v niektorých konštrukčných prvkoch namiesto pulzujúceho alebo opakovaného namáhania nepriaznivejšie namáhanie striedavé, ale v iných prípadoch sa dajú tieto namáhania predpätím obmedziť.

Príkladom môže poslúžiť spojitý nosník žeriavovej dráhy, ktorý je vhodne doplnený predpínacími ťahadlami. Tak sa pri presune bremena z jedného poľa do druhého obmedzí striedanie ťahových a tlakových napätí v nosníku, nakoľko sa pružné votknutie nosníkov nad podperami stane tuhším. Okrem obmedzenia deformácií to má za následok aj zlepšenie namáhania vzhľadom na únavu.

2.1.5 Zmenšenie deformovateľnosti konštrukcie

Existujú rôzne názory na posudzovanie pretvorenia konštrukcií. Pohľady na problematiku sa rozchádzajú v tom, odkiaľ sa má priehyb predpätej konštrukcie merať – či od vodorovnej, alebo vzopätej polohy, získanej aplikáciou predpätia.

Ak uvažujeme predpätie ako druh zaťaženia, priehyb počítame od vodorovnej polohy. Výsledok predpätia je taký, ako by sa vytvorila tuhšia konštrukcia.

Ak sa však predpätie považuje za určitý druh nadvýšenia, priehyb sa potom počíta od nadvýšenej polohy. Predpätie je spojené s vytvorením počiatočnej deformácie opačného znamienka, než sú deformácie od rozhodujúcich vonkajších zaťažení.

So zmenšovaním deformovateľnosti konštrukcie prostredníctvom vneseného predpätia bezprostredne súvisí zvyšovanie jej tuhosti. Obecne sa dá povedať, že ťahové sily tuhosť konštrukcie zväčšujú a tlakové ju naopak znižujú.

Pre zmenšenie deformovateľnosti konštrukcie je teda výhodné do štíhlych tlačných prútov zaviesť ťahové predpätie. Tým pádom aj pôvodne netuhé prvky môžu prenášať tlakové zaťaženie. Ak sa netuhý prvok predopne silou v ťahu väčšou ako bude jeho maximálne zaťaženie v tlaku, potom tlak, ktorý vznikne behom prevádzky, bude len znižovať ťah od predpätia, ale úplne ho neprekročí. Prvok tak vždy ostane ťahaný a tým pádom sa bude správať ako tuhý [10].

2.1.6 Použitie vysokopevnostných ťahadiel na predpínanie

Praktické využitie netuhých prvkov z vysokopevnostných materiálov je možné až po uplatnení predpätia. V opačnom prípade vznikajú príliš veľké deformácie, čo môžeme ľahko dokázať porovnaním predĺžení ťahaných prútov dĺžky l z obyčajnej a vysokopevnostnej ocele.

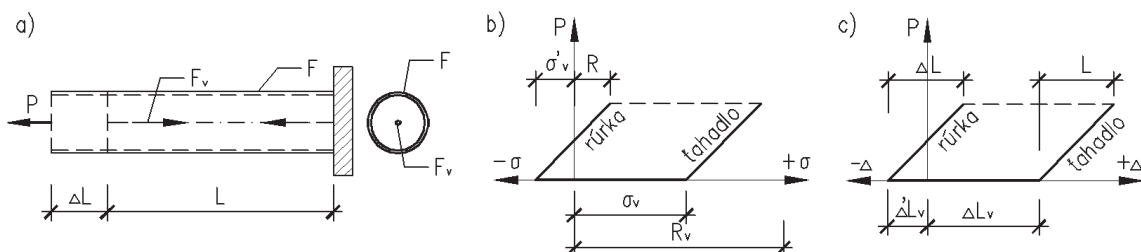
Pri plnom využití sú predĺženia prútov z obyčajnej a vysokopevnostnej ocele nasledovné:

$$\Delta l_1 = R_1 \frac{l}{E_1} \quad \text{a} \quad \Delta l_2 = R_2 \frac{l}{E_2}. \quad (1)$$

Ich pomer

$$\frac{\Delta l_2}{\Delta l_1} = \frac{E_1 R_2}{E_2 R_1} \quad (2)$$

závisí na veľkosti výpočtových namáhání R_1 , R_2 a modulov pružnosti E_1 , E_2 .



Obr. 8 Kombinovaný prút (a), napätie (b) a deformácia (c)

Okrem samostatne používaných vysokopevnostných prvkov (napr. v lanových sústavách) sa tieto prvky používajú aj v kombinovaných sústavách, dielcoch alebo konštrukciách vytvorených z obyčajnej a vysokopevnostnej ocele. Nadmerné deformácie sa tým zmenšia. Ukážeme si to na jednoduchom modeli kombinovaného prúta (obr. 8) vytvoreného z rúrky (obyčajná oceľ, plocha prierezu F) a predpätého ťahadla (vysokopevnostný materiál, plocha prierezu F_v). Pre maximálne tlakové napätie v rúrke od predpätia platí $\sigma'_v = R/\vartheta$. V ťahadle bude predpätie v ťahu $\sigma_v < R_v$. Tuhý prvok je teda predpätý napätím opačného znamienka ako napätie od neskoršieho zaťaženia. Pri zaťažení prúta ťahovou silou P oba materiály pôsobia spoločne. V tuhom prvku sa najprv tlmí predpätie v tlaku a následne ťahové napätia rastú po medznú hodnotu. Prírastok napätia v predpätom ťahadle je vykrytý svojou vysokou pevnosťou. Kombinovaný predpätý prút je schopný preniesť celkovú silu

$$P = FR + F_v R_v = FR(1 + \vartheta), \quad (3)$$

kde

$$\varphi = \frac{F_v}{F} \quad \text{a} \quad \vartheta = \frac{R_v}{R}.$$

Výraz $(1 + \varphi\vartheta)$ reprezentuje zvýšenie únosnosti tuhého prvku v dôsledku predpätia vysokopevnostným ťahadlom. Bez predpätia by sa vysoká pevnosť ťahadla nedala využiť. Ako vyplýva z deformačných podmienok, pri malej prierezovej ploche F_v (umožnenej vysokým výpočtovým namáhaním R_v) by ťahadlo preberalo len malú časť sily P .

Pri predpínaní sa tuhý prvok skráti o hodnotu Δl_v a ťahadlo sa predĺži o hodnotu Δl_v . Porovnaním deformácií prútov z bežnej ocele Δl_1 , z vysokopevnostnej ocele Δl_2 a kombinovaného prúta Δl získavame postupnosť:

$$\Delta l_1 < \Delta l < \Delta l_2. \quad (4)$$

Z uvedeného vzťahu je zrejmé, že deformácia kombinovaného prvku bude menšia ako by bola v prípade, kedy by bol prvok vyrobený iba z vysokopevnostného materiálu, ale zároveň bude väčšia ako v prúte z obvyčajnej ocele. Prínos predpätia ťahadlami z vysokopevnostného materiálu sa prejaví v konštrukciách zložitejších ako je prút, a to hlavne v plnom využití prvkov z vysokopevnostného materiálu, v redistribúcii napätia a v zmene statického systému [10].

2.2 Vybrané typy predpätých oceľových konštrukcií

Ciele sledované predpínaním kovových konštrukcií, ktoré sme zhrnuli v predchádzajúcej časti, možno dosiahnuť rôznymi spôsobmi. V tejto časti textu sa budeme venovať konštrukciám, pri ktorých sa na predpínanie používajú prvky z vysokopevnostných materiálov – najčastejšie ide o ťahadlá, teda patentované drôty, káble, laná alebo tyče. Túto skupinu konštrukcií môžeme ďalej rozdeliť na tri podskupiny:

- (a) *konštrukcie vytvorené z dvoch častí* – kde tuhá časť (prút, nosník, rám, oblúk) je z obvyčajnej ocele alebo ľahkých zliatin, a netuhá časť (predpínacie systémy) z vysokopevnostnej ocele,
- (b) *predpäté lanové sústavy* – u týchto konštrukcií sa predpínaním obvyčajne zvyšuje tuhosť a umožňuje netuhým prvkom preberať tlakové sily,
- (c) *predpínané stožiare a veže* – predpínaním sa zväčšuje predovšetkým tuhosť základnej konštrukcie.

V ďalšom texte sa budeme venovať prvým dvom typom konštrukcií.

2.2.1 Konštrukcie z dvoch častí

Najrozšírenejším a najpoužívanejším typom predpätých konštrukcií sú nosníky – priehradové i plnostenné, vzpínadlá a vešadlá predpäté ťahadlami z vysokopevnostnej ocele.

Predpäté priehradové nosníky

Podľa polohy predpínacích prvkov môžeme rozlíšiť 4 typy konštrukcií:

1. *Predpínajú sa len jednotlivé prvky konštrukcie* (obr. 9a)

Najčastejšie sa predpínajú najviac namáhané diagonály a najviac namáhané prúty ťahaných pásov, pritom každé ťahadlo ovplyvňuje nanejvýš jeden prút základnej sústavy a musí sa osobitne predpínať a kotviť. S tým sú spojené komplikácie pri konštruovaní styčníc (veľká prácnosť výroby). Tento typ je preto vhodnejší pre prúty väčších dĺžok (aspoň 6–8 m), pri prostých nosníkoch môže rozpätie dosahovať až 42 m. Tento typ predpínania je vhodný pre zosilňovanie ťahaných prútov konštrukcie.

2. *Súčasné predpínanie viacerých prútov v jednej línii* (obr. 9b)

Jedno predpínacie ťahadlo zároveň napína niekoľko prútov základnej konštrukcie, pričom osi predpínacieho ťahadla a predpínaných prútov sú súbežné (napr. napínanie prútov ťahaného pásu priehradovej konštrukcie). Tento typ konštrukcií je vhodný pre stredné rozpätia, kde sa z výrobných dôvodov ešte neodstupňovávajú prierezy pásových prútov (prosté nosníky okolo 24–30 m). Predpätím sa odľahčia najviac namáhané prvky.

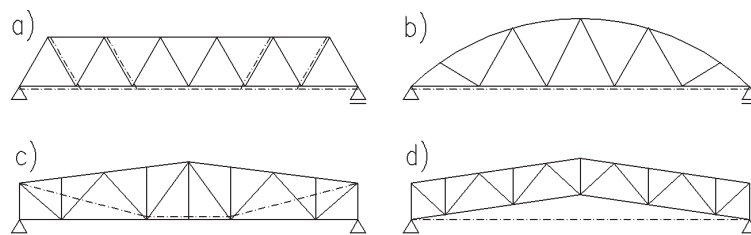
3. *Súčasné predpínanie viacerých prútov vo vzájomne všeobecnej polohe* (obr. 9c)

V týchto konštrukciách sa jedným alebo dvoma predpínacími systémami, ktoré ale nepresahujú mimo obrys základnej konštrukcie, priaznivo ovplyvňuje predovšetkým napätosť ťahaných pásov a diagonál, ktoré sa križujú s predpínacími ťahadlami. Tento systém predpínania je vhodný pre rozmanitejšie konštrukcie, u prostých nosníkov pre rozpätia nad 24 m. Predpínacie sily a prvky treba vhodne prispôbovať so zreteľom na odstupňovanie prierezov základnej konštrukcie.

4. *Predpínanie všetkých alebo väčšiny prvkov základnej konštrukcie jedným alebo malým počtom predpínacích systémov* (obr. 9d)

Predpínacie prvky môžu čiastočne alebo úplne prebiehať mimo obrysu základnej konštrukcie (patria sem napr. vešadlá a vzpínadlá). Z toho vyplýva, že v tomto type konštrukcií sa dosahuje najväčšia úspora materiálu. Najúčinnnejšími sa preukázali priehradové nosníky typu *rám, resp. oblúk s ťahadlom*.

Z druhej strany, dôsledkom toho, že ťahadlo nie je spojené s ťahaným pásom stabilizačnými diafragmami, nezmenšuje jeho vzperné dĺžky a teda nezaistuje jeho stabilitu pri predpätí. Stabilitu spodného pásu možno zaistiť vytvorením trojbokého priehradového nosníka, alebo predpínaním zdvojených nosníkov. Celkovo je ale konštruovanie stavieb tohto typu zložitejšie, a to najmä v prípade s dopĺňujúcimi stojkami.



Obr. 9 Príklady predpätých priehradových nosníkov

V konštrukciách 1. a 2. typu sa predpínacie ťahadlá umiestňujú tak, aby boli v rovine jednej hlavnej osi prierezu a aby výslednica síl prechádzala ťažiskom prierezu prúta. Stabilita predpätých prútov sa zaisťuje tzv. *stabilizačnými diafragmami* alebo *objímkami*. Ich rozstupy potom určujú vzperné dĺžky prútov a volia sa tak, aby sa štíhlostný pomer úsekov pohyboval v rozmedzí 50–60.

Naproti tomu, pre konštrukcie 3. a 4. typu je charakteristické umiestnenie predpínacích prvkov buď vo zvislej rovine súmernosti, alebo súmerne vzhľadom na zvislú os nosníka. Na stabilizáciu tlačенých pásov sa navrhujú tenkostenné prierezy s veľkými momentmi zotrvačnosti vzhľadom na rovinu nosníka, využívajú sa vzpery alebo ťahadlá stabilizujúce pásy a/alebo diagonály, alebo sa vytvárajú priestorové konštrukcie.

Predpínacie vysokopevnostné prvky sa kotvia v styčníkoch pomocou kotiev. Pri vzájomnom presahu ťahadiel sa môže na kotvenie využiť silná diafragma, ktorá ale nesmie prekážať ostatným ťahadlám v pozdĺžnej deformácii. Kvôli zvýšenému namáhaniu v styčníkoch s kotvami, alebo kde sa mení smer ťahadla, sa nesmie zabudnúť na dostatočné vystuženie – je to miesto, kde sa môže nosník najľahšie porušiť.

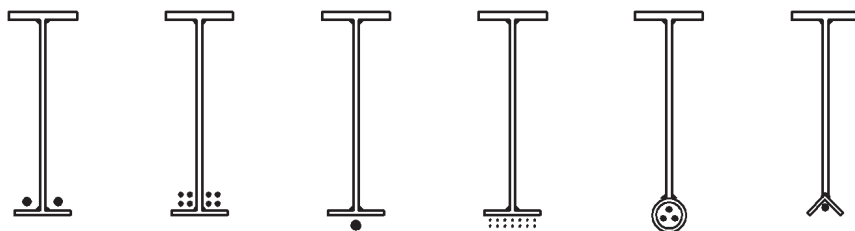
Predpäté plnostenné nosníky

Umiestnenie ťahadiel u predpätých plnostenných nosníkov býva rôzne. Konštrukčne aj výrobné najjednoduchšie sú prosté nosníky s priamym ťahadlom umiestneným pri spodnom páse. Ťahadlo môže byť natiahnuté po celej dĺžke nosníka v prípade, že sa pripája až pri montáži a ak je možné ho pri podperách lepšie ukotviť. Nosníky, ktoré sú predpäté ťahadlom len na časti rozpätia, je vhodné navrhovať s premenlivou výškou nad podperami. Pri veľkých rozpätiach je vhodné použiť rôzny počet predpínacích ťahadiel v jednotlivých úsekoch nosníka v závislosti na veľkosti a priebehu ohybových momentov.

Pri veľkých posúvajúcich silách je vhodné navrhnúť ťahadlo v oblasti podpier sklonené alebo zakrivené. Tým pádom preberie časť posúvajúcej sily a umožní nám zmenšiť hrúbku steny nosníka. Na iné ako priame ťahadlo sa však spotrebuje viac materiálu, okrem toho sú potrebné špeciálne vodiace zariadenia, vznikajú trenia a pod., čo má negatívny dopad na hospodárnosť návrhu.

Predpínacie ťahadlá sa umiestňujú po stranách steny nosníka, pod spodným pásom alebo vnútri spodného pásu, ak je tvorený uzavretým profilom. V potrebnej polohe sa udržiavajú pomocou medziťahlých konzoliek alebo pomocou výstuh. Kotvia sa na čelách nosníkov, na vyložených tuhých oporách – konzolách, alebo priamo do oceľobetónovej

dosky. Pri dimenzovaní nosníka treba mať na pamäti, že v miestach ukotvenia ťahadiel vznikajú veľké napätia, kritická je najmä stena.



Obr. 10 Príklady umiestnenia predpínacích ťahadiel v plnostenných nosníkoch

Vďaka excentrickej polohe predpínacieho ťahadla vzhľadom k osi nosníka vznikajú okrem tlakových síl aj ohybové momenty. Keby sa takýto nosník navrhol v priečnom reze ako symetrický, nedosiahlo by sa jeho plné využitie. Výhodné je preto navrhnúť prierez asymetrický s rozvinutým tlačným pásom.

Predpäté vzpínadlá a vešadlá

Na predpäté vzpínadlá a vešadlá môžeme svojím spôsobom pozeráť ako na určitý typ predpätých plnostenných alebo priehradových nosníkov.

Vzpínadlo je druh nosnej konštrukcie, v ktorej je hlavný vodorovný trám vystužený ťahadlami a krátkymi stĺpikmi (vzperami). Hlavný nosník je čiastočne odľahčený od ohybového namáhania tým, že je prevedené na jeho tlakové namáhanie, na tlakové namáhanie stĺpikov a ťahové namáhanie vzpínadla. Výhodou oproti ohybovému namáhaniu je to, že pri osovom namáhaní sa využíva celý prierez rovnomerne, čím sa zväčšuje únosnosť prvku, prípadne sa môžu navrhnúť menšie profily [25].

Vzpínadlá, či už predpäté alebo nie, možno výhodne využiť v prípadoch, kedy je k dispozícii dostatočná konštrukčná výška.

Pre čo najekonomickejší návrh je vhodné voliť najväčšiu vzdialenosť medzi osou vzpínadlového ťahadla a osou nosníka, a to v rozmedzí cca $1/4$ až $1/2,5$ rozpätia. Okrem toho je vhodné natrasovať ťahadlo tak, aby malo v rámci možností priebeh blízky tvaru momentovej čiary od rozhodujúceho zaťaženia.

Ťahadlo, ak pozostáva z jedného prvku, v priečnom reze sa umiestňuje do zvislej roviny súmernosti konštrukcie vzpínadla. Ak je ťahadlo z viacerých prvkov, umiestňujú sa tak, aby výslednica síl bola v rovine súmernosti.

Veľmi dôležitým aspektom vzpínadlových konštrukcií je zabezpečenie stability trámu v procese predpínania, obzvlášť vtedy, ak chýbajú priečne stužidlá, alebo sa predpína skôr, než sa vzpínadlo osadí na svoje definitívne miesto. Na zaručenie stability nosníkov je vhodné použiť dvojstenový trám, napr. z dvojice vhodne spojených valcovaných I alebo U profilov, ďalej skriňový profil, oceľovú rúrku vyplnenú ľahkým betónom a pod. Stojky sa robia z obdobných profilov, prípadne pri menších rozpätiach alebo zaťaženiach z uholníkov.

Predpätie možno dosiahnuť napr. napnutím ťahadla, alebo jeho pripevnením na pružne predohnutý trám, prípadne spojením prerušeného ťahadla cez čelné dosky vysokopevnostnými skrutkami alebo iným ekvivalentným spôsobom [10].

Príklady vzpínadlových konštrukcií

V súčasnosti predpäté vzpínadlá čoraz častejšie nachádzajú uplatnenie pri zastrešení objektov veľkých rozpätí. Využitím vysokopevnostného materiálu ťahadla sa eliminuje množstvo použitého materiálu, konštrukcia sa „prevzdušňuje“ a vytvára sa nový priestor pre prípadnú inštaláciu rôznej techniky.

Z množstva súčasných príkladov týchto konštrukcií na území ČR môžeme spomenúť napr. predopnuté zastrešenie átrií Nového ústredia ČSOB v Prahe. Konštrukcie striech átrií majú tvar valcovej plochy polomeru 175 m nad pôdorysom 27×32 m a na priečných osiach objektu nadväzujú na zastrešenie halových kancelárií v tvare konoidu. Pôvodný architektonický návrh zastrešenia priestorovou priehradovou doskou bol nakoniec nahradený systémom rovinných vzpínadiel v tvare šošovky (oblúkový horný pás doplnený spodným ťahadlom napnutým taktiež do oblúka). Spodný pás tvorí tyčové ťahadlo Macalloy z vysokopevnostnej ocele priemeru 39 mm. Všetky prípoje ťahadiel a zvislíc vzpínadiel boli realizované cez čapový prípoj. Vďaka jednotnosti styčníc konštrukcia dostala podobu „reťaze“ [30].

Ďalej môžeme spomenúť O₂ Arénu v Prahe (pôvodne Sazka Aréna). Ide o konštrukciu zastrešenia v tvare guľového vrchlíka s priemerom 135 m a vzopätím iba 9 m, na ktorej realizáciu bola zvolená koncepcia priestorového vzpínadla s 36 radiálnymi rúrkovými priehradovými väzníkmi s predpätými ťahadlami [21].

Podobnú konštrukciu zastrešenia plochou štíhlou klenbou má Werk Aréna Třinec, kde oceľová konštrukcia strechy má opäť tvar guľového vrchlíka, tvoreného v priečnom smere rovinnými oblúkovými vzpínadlami s maximálnym rozpätím 60 m. Priehradové rúrkové väzníky majú konštrukčnú výšku 3 m a sú doplnené predpätým ťahadlom Macalloy M100 s medzou klzu 520 MPa [22].



Obr. 11 Konštrukcia rovinného vzpínadla zastrešenia átria nového ústredia ČSOB [30]

Predpäté vzpínadlá sa s oblúhou používajú aj ako nosný prvok lávok a mostov. Historicky najmladšie zaujímavé konštrukcie tohto typu nachádzame napr. v Hradci Králové a Jaroměři.

Lávka pre peších a cyklistov cez rieku Orlicu v Hradci Králové bola postavená v roku 2012 a spája historické centrum s univerzitným kampusom. 70 metrovú oceľovú konštrukciu lávky tvorí trojica vzpínadlových nosníkov, ktoré majú vo vrchole horného pásu kĺb. Dolný pás je tvorený polygónom z ťahadiel priemeru 90 mm, horný pás pozostáva z valcovaných profilov HEB 450 v osovej vzdialenosti 2,25 m. Rozpery medzi pásmi tvorí prvok v tvare písmena A umiestnený pod stredným kĺbom a dva zväzky v tvare písmena V v krajných štvrtinách rozpätia lávky. Zvislé a vodorovné zavetrovanie zabezpečujú ťahadlá M48, resp. M30 [31].



Obr. 12 Lávka pre peších s predpätým vzpínadlom v Hradci Králové[31]

V roku 2015 bola na mieste pôvodného Komenského mosta v Jaroměři postavená nová oceľová vzpínadlová lávka dĺžky 61,5 m. Nosnú konštrukciu lávky tvorí priestorovo tuhý trojhran, pozostávajúci z tlačných prvkov – rúrky $\varnothing 762/16$ mm a troch profilov HEA 240, na ktorých je osadená mostovka z pororoštov, a trojice ťahadiel – $1 \times \varnothing 102$ mm + $2 \times \varnothing 52$ mm, ktoré sú cez závitové spojky kotvené do objímok na koncoch priečnikových ramien. Celý ťahový systém končí v závitových maticiach, ukotvených v zväzcoch oboch koncových polí. Predpätie do ťahového systému bolo vnášané hydraulicky cez napínákové matice umiestnené uprostred jednotlivých ťahadlových polí. Konštrukčná výška uprostred rozpätia je 4,65 m.

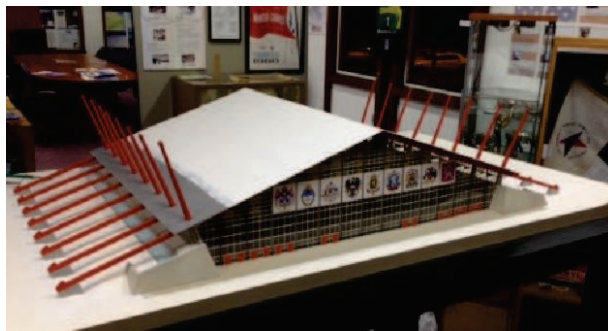


Obr. 13 Lávka pre peších s predpätým vzpínadlom v Jaroměři [29]

Vešadlové konštrukcie

Obdobou vzpínadiel sú vešadlá, ktoré našli uplatnenie pri konzolách a spojitých nosníkoch. Ide vlastne o sústavy vytvorené z tuhého trámu, pylónov a sklonených ťahadiel. V zásade sa rozlišujú dva systémy – *systém zväzku* (ťahadlá sa zbiehajú do jedného bodu v pylóne) a *systém harfy* (ťahadlá sú v pylóne umiestnené v rôznych výškach).

Zaujímavou vešadlovou konštrukciou bolo zastrešenie haly klziska v Squaw Valley postavenej pre zimné olympijské hry roku 1960. Laná predpínali šikmé stĺpy, odkláňajúc ich smerom od osi konštrukcie. Šikmé nosníky mali škrupinový prierez a tak isto ako stĺpy mali prierez premenlivej výšky.



Obr. 14 Maketa haly klziska v Squaw Valley pre ZOH roku 1960

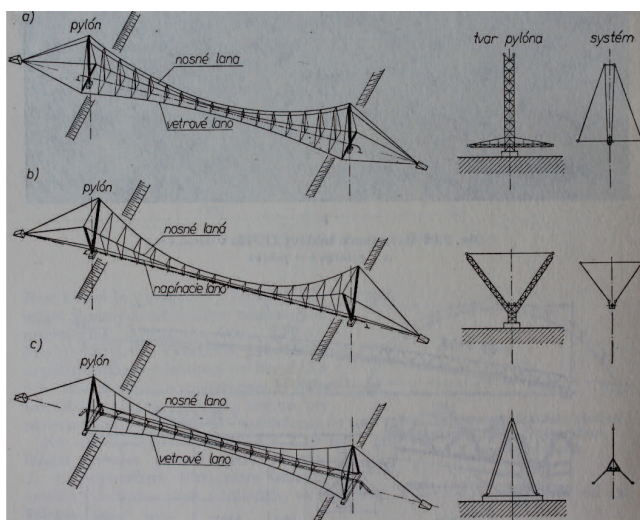
2.2.2 Predpäté lanové sústavy

Predpäté lanové sústavy mostného staviteľstva

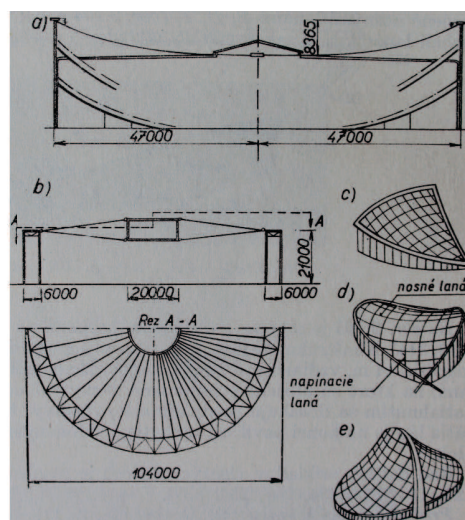
Predpäté lanové sústavy sa tešia veľkej obľube v mostnom staviteľstve. Časté uplatnenie nachádzajú v potrubných mostoch, pri ktorých vzhľadom na povahu a usporiadanie vonkajších síl možno upustiť od visutého mosta s tuhým rámom.

Existuje niekoľko typov potrubných mostov. Potrubie môže byť zavesené na paralelných nosných lanách usporiadaných v tvare výslednicového polygónu. Účinky vetra preberajú a celkovo konštrukciu vystužujú horizontálne vetrové laná, ktoré sú na hlavné nosné laná pripevnené pomocou závesov. Oba typy lán, rozopierané charakteristickým tvarom pylónov, sú uchytené do kotevných blokov.

Iným typom môže byť priestorová predpätá trojboká sústava rozoprená pylónmi tvaru písmena Y. Aj v tomto prípade sú nosné i predpínacie laná kotvené do spoločných kotevných blokov. Predpínacie laná, ktoré sú s potrubím rovnobežné, zaisťujú tuhosť celej konštrukcie. Naopak, predpäté laná zabráňujú tomu, aby sa nosné laná vyradili z činnosti pri vztlaču vetra. Okrem toho sú uprostred rozpätia spojené s nosnými lanami, čím efektívne znižujú ich pozdĺžne vodorovné i zvislé deformácie od jednostranného zaťaženia systému [10].



Obr. 15 Některé typy potrubných mostov [10]



Obr. 16 Některé typy visutých striech [10]

Predpäté lanové sústavy pozemného staviteľstva

Do tejto kategórie konštrukcií patria predovšetkým *visuté strechy*, ktoré sú v súčasnosti jedným z najekonomickejších spôsobov zastrešenia veľkých pôdorysov. Visuté strechy sú vláknové alebo membránové konštrukcie napnuté medzi pevnými bodmi a majú spravidla nosnú i kryciu funkciu zároveň. Hlavné prvky sú prevažne namáhané ťahom. Membrána môže byť z tkaniny alebo plechu – vtedy hovoríme o *visutej streche stanového typu*. Ekonomickejšie je však použiť namiesto membrány siete z lán s potrebnou výplňou. Vzhľadom na veľmi malú vlastnú tiaž konštrukcie môže vztlak vetra spôsobiť naddvihnutie časti strechy, čo môže viesť k porušeniu krytiny či rozkmitaniu celej strešnej konštrukcie, prípadne nebezpečnému namáhaniu oporných prvkov. Tomuto nebezpečenstvu sa najčastejšie zabráňuje predpätím.

Veľkú časť predpätých lanových sústav možno rozdeliť do nasledovných skupín:

- (a) konštrukcie s jediným systémom súbežných nosných lán,
- (b) konštrukcie s radiálne usporiadaným systémom lán,
- (c) konštrukcie s dvomi krížiacimi sa systémami lán.

Okrem toho existujú sústavy vymykajúce sa takejto kategorizácii. Medzi najzaujímavejšie predpäté lanové konštrukcie iste patrí už spomínaná prvotina zastrešenia arény v Raleigh v USA, alebo predpäté lanové nosníky typu Jawerth.

V prípadoch, kedy nie je vhodné použitie klasických väznicovo-väzníkových sústav, alebo iných spomínaných predpínaných systémov, ukazuje sa ako rozumné použiť nosný systém z predpätých drôtov, známy ako *strecha typu Dr. Maculan*. Podstatou systému je použitie predpätých vysokopevnostných drôtov maximálneho priemeru 8 mm; drôty sa vždy umiestňujú v dvojiciach vo vzájomnej osovej vzdialenosti 300 až 800 mm a sú vedené

rovnobežne s pozdĺžnou osou strechy. Krytina leží priamo na nich. Vysoké predpätie drôtov dáva streche takmer rovný podhľad a stabilizuje ju proti rozkmitaniu vetrom.

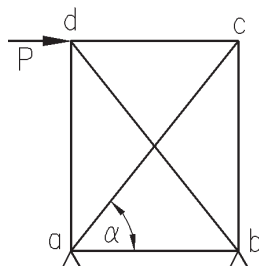
Najväčším pozitívom tohto typu zastrešenia je ľahká krytina, ktorá má za následok menšie dimenzie drôtov, podpier i základov, ale aj montáž bez lešenia. Strechy typu Dr. Maculan sú vhodné na nevykurované, prípadne málo vykurované objekty veľkých pôdorysných rozmerov, pričom jeden rozmer výrazne prevláda. Nachádzame ich na prístreškoch perónov, skladoch, priemyselných a výstavných halách, športových tribúnach, špeciálne na objektoch s možnosťou explózie v zastrešenom priestore alebo na poddajnom podloží [10].

3 Vplyv predpätia na správanie sa konštrukcie

3.1 Analýza časti priehradovej konštrukcie s predpätými stužidlami

Pre analýzu vplyvu predpätia na celkové správanie sa konštrukcie využijeme jednoduchý príklad, ktorý je uvedený v [10] na str. 17.

Ide o časť priehradovej konštrukcie, v ktorej spodná (resp. horná) priečľa zviaza s diagonálou obecný uhol α , zaťaženej bodovou silou P podľa obr. 17.



Obr. 17 Časť priehradovej konštrukcie s netuhými diagonálami

Keby všetky prvky boli tuhé a teda schopné prenášať tlakové zaťaženia, každá z diagonál by prenášala rovnako veľkú osovú silu $P/(2 \cos \alpha)$ opačného zmyslu.

Predpokladajme ale, že diagonály sú z netuhých prvkov. „Ak sú nepredpäté, pri pôsobení sily P jedna vybočí, pričom druhá bude namáhaná ťahom veľkosti $P/\cos \alpha$. Predpätím jednej z diagonál silou $P/(2 \cos \alpha)$ vznikne v druhej diagonále súčasne rovnako veľká sila. Pri pôsobení vodorovnej sily P v ťahanej diagonále sa osová sila bude meniť od $P/(2 \cos \alpha)$ po $P/\cos \alpha$ a v tlačenej diagonále od $P/(2 \cos \alpha)$ po 0. Posunutie styčníka c je polovičné ako pri sústave bez predpätia.“ [10]

Na overenie citovaného textu bol tento príklad namodelovaný a následne skúmaný v programe SCIA Engineer. Pri analýze bolo zistené, že formulácia textu je zavádzajúca, prípadne nepresná. Neplatí totižto, že ak predopneme jednu diagonálu predpínacou silou $P/(2 \cos \alpha)$, pri pôsobení vodorovnej sily P v ťahanej diagonále sa osová sila bude meniť od $P/(2 \cos \alpha)$ po $P/\cos \alpha$ a v tlačenej diagonále od $P/(2 \cos \alpha)$ po 0. Pri spomínanej veľkosti predpätia by sa osovú sily v ťahanej diagonále menili od $P/(4 \cos \alpha)$ po $P/\cos \alpha$ a v tlačenej diagonále od $P/(4 \cos \alpha)$ po 0, čo by znamenalo nesymetrické zväčšovanie, resp. zmenšovanie osových síl v diagonálach, čo je nelogické (východiskové ťahové sily v diagonálach od predpínacej sily $P/(2 \cos \alpha)$ by boli $P/(4 \cos \alpha)$). Ak chceme predpätím dosiahnuť v oboch diagonálach východiskové ťahové sily $P/(2 \cos \alpha)$, musíme jednu diagonálu predopnúť dvojnásobnou silou, teda $P/\cos \alpha$, a potom budú platiť rozmedzia osových síl spomínané v citovanom texte.

Faktom je, že v danom prípade budú vždy osovú sily v diagonálach polovičné oproti pôvodnej predpínacej sile.

Predpokladajme, že ohybovo netuhé diagonály sú rozmerovo a tuhostne totožné ($l_1 = l_2 = l$, $k_1 = k_2 = k$) a že ostatné prvky priehrady sú nekonečne tuhé ($k_p = \infty$). Jednu

z diagonál v danom systéme predopneme silou F . Toto namáhanie spôsobí posunutie nekonečne tuhej priečky, čím sa ťahovo aktivuje aj druhá diagonála. Berúc do úvahy obe diagonály a hornú priečku vznikne systém paralelného zapojenia dvoch rovnako tuhých prvkov cez nekonečne tuhý roznášací prvok. Celková tuhosť k_{celk} tohto systému bude

$$k_{celk} = k_1 + k_2 = 2 \cdot k = 2k. \quad (5)$$

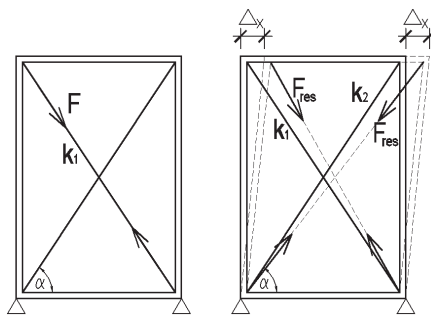
Predpínacia sila F v systéme vyvolá deformáciu Δ :

$$\Delta = \frac{F}{k_{celk}} = \frac{F}{2k}, \quad (6)$$

z čoho po prenasobení tuhosťou jednej diagonály dostávame výslednú normálovú silu v diagonále F_{res} :

$$F_{res} = \Delta \cdot k = \frac{F}{2k} \cdot k = \frac{F}{2}. \quad (7)$$

Aplikovaním predpätia do diagonály získame *nový východiskový stav* konštrukcie, v ktorom sú obidve diagonály namáhané ťahom. Predpätie v *tlačenej* diagonále jej teda umožní prenášať tlakové sily až do výšky reziduálnej sily, ktorá v nej vznikla od predpínania (F_{res} , resp. $P/2 \cos \alpha$).



Obr. 18 Odvodenie tuhosti systému a prerozdelenie vnútorných síl od predpätia

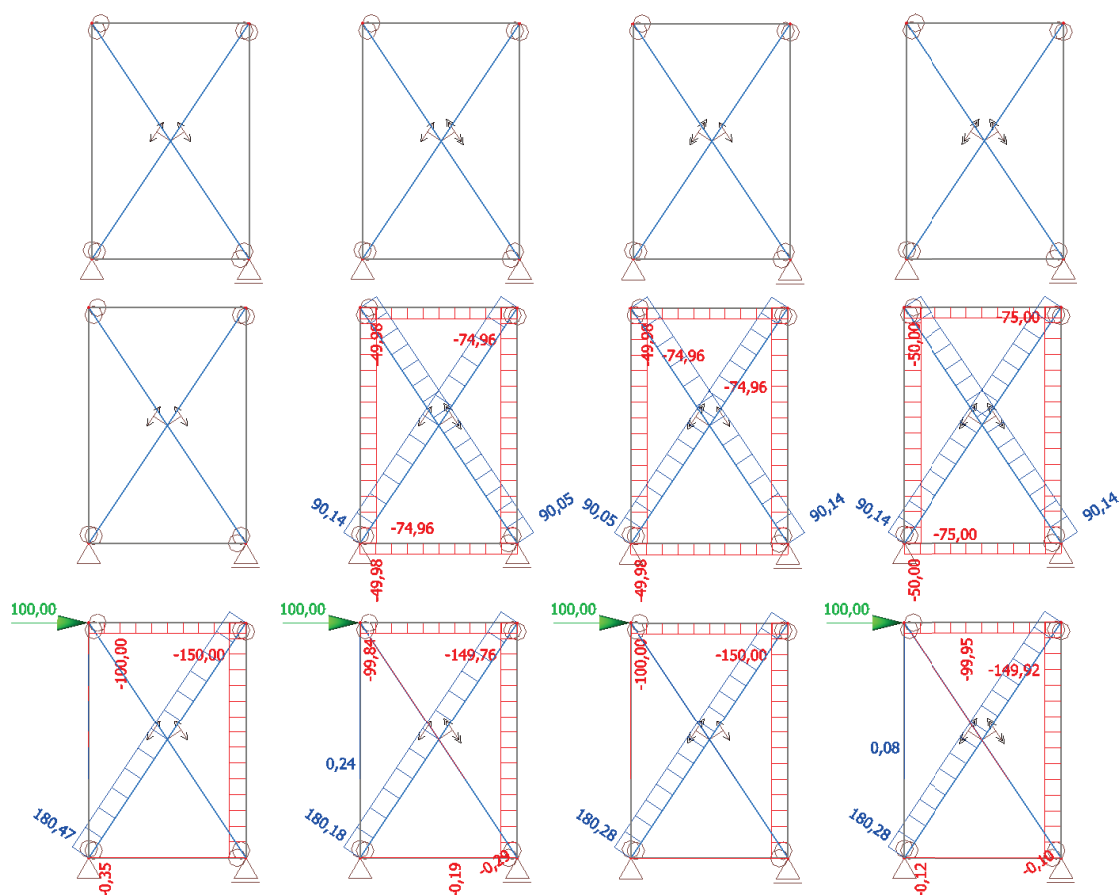
3.2 Predpätie v programe SCIA Engineer 16.1

Táto podkapitola je venovaná problematike počiatočného predpätia a jeho zadávaniu a vyhodnocovaniu v programe SCIA Engineer 16.1. Budeme opäť vychádzať z predchádzajúceho príkladu.

Uvažujeme časť priehradovej konštrukcie rozmerov $1,0 \times 1,5$ m s nekonečne tuhými obvodovými prvkami a ohybovo netuhými diagonálami rovnakých tuhostných vlastností. Nekonečnú tuhosť vytvoríme napr. zväčšením modulu pružnosti materiálu – v tomto prípade sme stanovili $E = 2,1 \times 10^{14}$ Pa. Netuhosť diagonál v prípade nepredpínaného systému zaistíme nelinearitou na prúte – *iba ťah*. V prípade predpínaného systému prútu priradíme nelinearitu *počiatočné napätie*. Tu si však treba uvedomiť, že v prípade vyčerpania a prekročenia ťahovej predpínacej sily v inak tlačenej prúte sa jeho namáhanie pri

zvážšovaní zaťaženia nezastaví na nule, ale pôjde do záporných hodnôt a bude sa s ním počítať ako s prvkom schopným prenášať tlakové zaťaženia. V takom prípade pre zaistenie korektnosti výpočtu treba zvýšiť predpínaciu silu tak, aby pri maximálnom zaťažení bola prinajhoršom úplne eliminovaná, ale nie prekročená. Tento problém sa však dá eliminovať priradením nelinearity typu *priame lano* s príslušnou predpínacou silou. V tomto prípade však musí byť použitá výpočtová metóda Newton-Raphson, nesmie sa použiť metóda Timoshenko (program to nedovolí).

Na obr. 19 sú postupne zobrazené riešené varianty spomínanej priehradovej konštrukcie. V prvom variante zľava bola obom diagonálam priradená nelinearita na prúte *iba ťah* (označená jednoduchou šípkou), v druhom je predpínaná diagonála spájajúca zaťažovaný styčník s pravou posuvnou podperou (označená dvojitou šípkou), v treťom variante je predpínaná diagonála spájajúca ľavú pevnú podperu s protilahlým styčníkom, zatiaľ čo v druhej diagonále je vylúčený tlak, a v poslednom stĺpci je prípad s predpínanými oboma diagonálami. V prvom riadku je ukážka zadania nelinearít na konštrukcii, v druhom riadku sú vykreslené vnútorné sily vyvolané predpätím príslušnej diagonály silou $P / \cos \alpha = 180,28$ kN (v poslednom stĺpci sú obe diagonály predpäté silou $P / (2 \cos \alpha) = 90,14$ kN), pričom uvažujeme silu $P = 100$ kN a uhol $\alpha = 56,31^\circ$. V treťom riadku je výsledné rozloženie síl od zaťaženia silou $P = 100$ kN na predpätej konštrukcii.



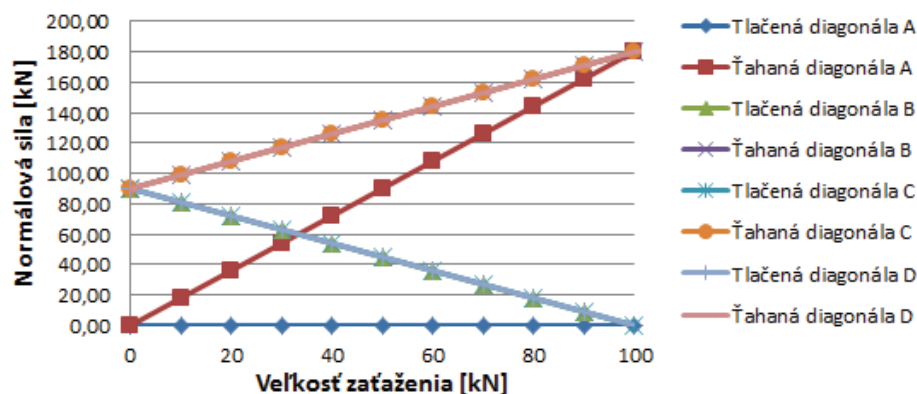
Obr. 19 Vplyv predpätia na rozloženie vnútorných síl v priebrade

Na základe obr. 19 by sa mohlo zdať, že počiatočné predpätie nemá na konštrukciu žiaden významný vplyv, keďže výsledné sily na predpätej i nepredpätej konštrukcii sú takmer totožné. Na obrázku a v tabuľke nižšie však vidíme rozdiely v priebehoch vnútorných síl a deformácií od narastajúceho zaťaženia ($P = 0$ kN až $P = 100$ kN).

Tab. 1 Normálové sily v diagonálach a posuny pravého horného styčníka v závislosti na predpínanom prvku a veľkosti zaťaženia

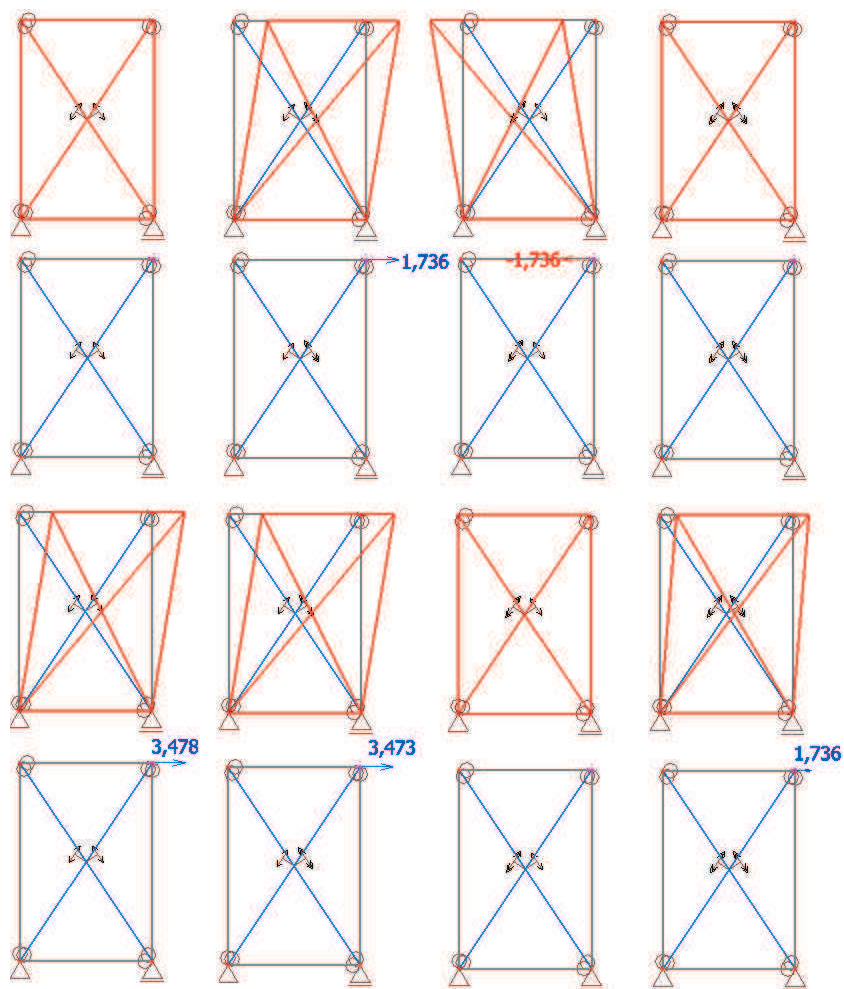
zaťaženie	(A) obe diagonály iba ťah				(B) predpätá tlačená diagonála				(C) predpätá ťahaná diagonála				(D) predpäté obe diagonály			
	tlačená diagonála	ťahaná diagonála	posun		tlačená diagonála	ťahaná diagonála	posun		tlačená diagonála	ťahaná diagonála	posun		tlačená diagonála	ťahaná diagonála	posun	
kN	kN	kN	mm		kN	kN	mm		kN	kN	mm		kN	kN	mm	
100	0,00	180,47	3,48		-0,29	180,18	3,47		0,00	180,28	0,00		-0,10	180,28	1,74	
90	0,00	162,41	3,13		8,75	171,18	3,30		9,02	171,26	-0,17		8,93	171,27	1,56	
80	0,00	144,35	2,78		17,79	162,18	3,13		18,04	162,24	-0,35		17,96	162,26	1,39	
70	0,00	126,29	2,43		26,82	153,18	2,95		27,06	153,22	-0,52		26,98	153,25	1,22	
60	0,00	108,24	2,09		35,86	144,18	2,78		36,07	144,20	-0,69		36,01	144,23	1,04	
50	0,00	90,19	1,74		44,89	135,18	2,60		45,08	135,18	-0,87		45,03	135,22	0,89	
40	0,00	72,14	1,39		53,92	126,17	2,43		54,10	126,15	-1,04		54,06	126,21	0,70	
30	0,00	54,10	1,04		62,96	117,17	2,26		63,11	117,13	-1,22		63,08	117,19	0,52	
20	0,00	36,06	0,69		71,99	108,16	2,08		72,12	108,10	-1,39		72,10	108,17	0,35	
10	0,00	18,03	0,35		81,02	99,15	1,91		81,13	99,07	-1,56		81,12	99,16	0,17	
0	0,00	0,00	0,00		90,05	90,14	1,74		90,14	90,05	-1,74		90,14	90,14	0,00	

Priebeh normálových síl v diagonálach v závislosti na predpätí a veľkosti zaťaženia



Obr. 20 Rozdiely v priebehu normálových síl v závislosti na predpätí a veľkosti zaťaženia

Hlavným významom predpätia v tomto prípade je však jeho vplyv na celkovú tuhosť konštrukcie, ktorý sa prejaví v posune pravého horného styčníka (viď stĺpce „posuny“ na obr. 3.2). Okrem toho na obr. 21 sú v prvých dvoch riadkoch v rovnakom poradí ako na obr. 19 zobrazené deformácie priehrady a posuny styčníka od predpätia, v treťom a štvrtom riadku deformácie a posuny predpätej konštrukcie zaťaženej bodovou silou $P = 100$ kN.



Obr. 21 Deformácie a posuny styčníka od predpätia (horné dva rady) a od zaťaženia (dolné dva rady)

Na prvý pohľad sa zdá, že ani v tomto prípade nevidíme žiaden pozitívny vplyv predpätia na tuhosť konštrukcie. K správne interpretovaniu získaných výsledkov preto musíme nahliadnuť do výkladu používania nelinearity typu *počiatočné napätie* v programe SCIA Engineer 16.1 [27]. Bohužiaľ, aj v tomto materiáli sa stretávame so vzájomne si odporujúcimi tvrdeniami.

V odseku venovanému nelineárnemu výpočtu III. rádu sa píše: „*Deformace z výsledků počátečního stavu se připočítají ke geometrii, řešení tedy probíhá na změněné geometrii. Počáteční zatížení se zavede do výpočtu jako staré, podobně jako u výpočtu fází. Po skončení výpočtu je třeba ještě připočítat počáteční deformace k deformacím řešené nelineární kombinace, aby uživatel dostal připočtením těchto celkových deformací k původní geometrii výsledný tvar konstrukce (neví totiž, že výpočet proběhl na změněné geometrii).*“ No vzápätí sa dodáva: „*Ve všech případech nelineárních výpočtů je tedy na rozdíl od lineárního řešení výsledek počátečního stavu plně zahrnut do výsledku řešení (včetně počátečních deformací)*“ [27].

Ak máme veriť citovanému textu z [10] spomínanému na str. 39 v tejto práci ohľadom posunu horného pravého styčníka, tak v prípade predpätej sústavy by mal byť polovičný v porovnaní s posunom toho istého styčníka v nepredpätej sústave. Keď sa pozrieme na hodnoty posunov na obr. 21, tak tento fakt spĺňa iba variant priehrady (D), v ktorom boli predpínané obe diagonály naraz. Súčasné symetrické napínanie oboch diagonál zabezpečilo, že konštrukcia sa vo vodorovnom smere nijak nezdeformovala, posun horných styčníkov $u_x = 1,74$ mm nastal až po zaťažení vodorovnou bodovou silou $P = 100$ kN a táto hodnota je naozaj polovičná oproti posunu styčníka nepredpätej konštrukcie ($u_x = 3,48$ mm).

Tento prípad nám však nedáva odpoveď na otázku, ako pracovať so získanými deformáciami, keďže počiatočné deformácie od predpätia sú nulové. Ak však uvažíme vnášanie predpätia do konštrukcie predpínaním jednej diagonály, konštrukcia sa zdeformuje a táto počiatočná deformácia bude mať v našom príklade hodnotu $u_x = \pm 1,74$ mm. Výsledný posun od vonkajšieho zaťaženia v prípade predpínania *tlačenej* diagonály je $u_x = 3,47$ mm, ale v prípade predpínania *tahanej* diagonály je nulový. Z toho možno usudzovať, že rozdiel medzi výslednými a počiatočnými deformáciami, ktorý je v oboch prípadoch rovnaký ($3,47 - 1,74 = 1,73$ mm a $0,0 - (-1,74) = 1,74$ mm), je spôsobený vonkajším zaťažením, a teda deformácie získané z nelineárnej kombinácie obsahujúcej predpätie a zaťaženie sú celkové deformácie (od predpätia i zaťaženia) vzťahujúce sa k pôvodne zadanej – od predpätia nedeformovanej – geometrii.

4 Parametrická štúdia vplyvu predpätia na rozloženie vnútorných síl v konštrukcii

4.1 Motivácia

Inšpiráciou a podkladom pre spracovanie tejto kapitoly poslúžila existujúca konštrukcia zastrešenia WERK ARENY v Trinci. Stavba tejto viacúčelovej haly začala koncom roku 2012 a dnes poskytuje možnosť naživo vidieť nielen hokejové zápasy 5 200 divákom. Okrem športu hala poskytuje moderné zázemie pre usporadúvanie rôznych kultúrnych a spoločenských akcií [33].

4.1.1 Reálna konštrukcia zastrešenia WERK ARENY v Trinci

Oceľová konštrukcia zastrešenia WERK ARENY má tvar guľového vrchlíka s nekruhovým pôdorysom rozmerov $74 \times 92,5$ m. V priečnom smere je tvorená rovinnými oblúkovými vzpínadlami s najväčším rozpätím 60 m a vzopätím 3 m, ktoré sú tvorené rúrkovými priehradovými väzníkmi konštrukčnej výšky 3 m a doplnené predpätými ťahadlami Macalloy M100 z materiálu s medzou klzu 520 MPa. Väzníky sú v pozdĺžnom smere stužené portálovými stužidlami, čím spoločne vytvárajú štíhlu klenbu. Vo voľnom priestore medzi konštrukciou väzníkov a ťahadlami sú umiestnené prvky osvetlenia, ozvučenia a ďalších prevádzkových technológií [23].

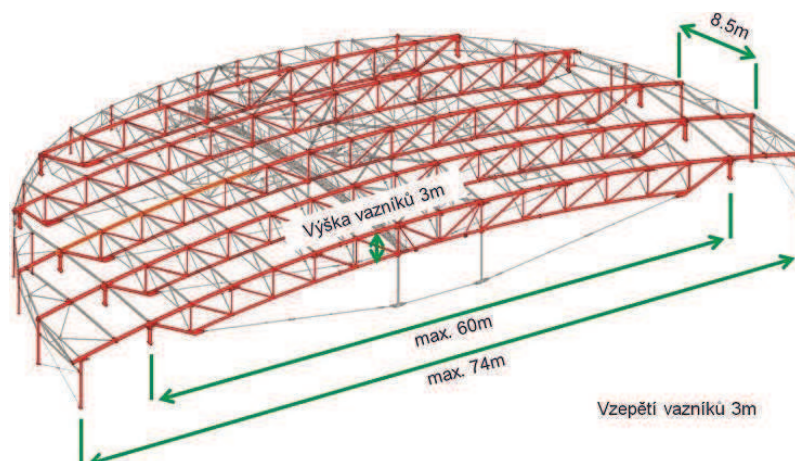
Tvar strechy je tvorený tak, že väzníky sú vo vrchole umiestnené na stredovej kružnici vo vzájomnej vzdialenosti cca 8,5–10,5 m. Väzníky majú vzhľadom na tvar guľového vrchlíka rôzny polomer oblúka horného pásu a rôzne rozpätia.

Portálové stužidlá v rozstupoch cca 4,3 m nielen stabilizujú spodný pás väzníkov, ale aj čiastočne pôsobia ako nosný prvok s klenbovým účinkom priestorovej konštrukcie. Tieto stužidlá zároveň plnia funkciu väzníc, na ktoré je ukladáný trapézový plech skladaného strešného plášťa.

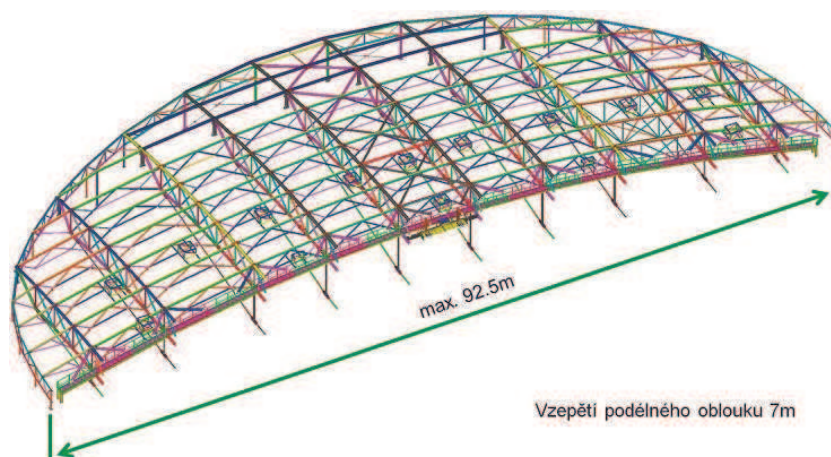
Väzníky sú na oboch koncoch uložené na kývných stĺpoch kotvených do hlavných betónových prievlakov tribún. Priestorovú tuhosť zabezpečuje systém strešných a stenových stužidiel. V strešnej rovine sú pásové krížové stužidlá vedené v priečnej a pozdĺžnej osi haly, obvodové stĺpy sú vzájomne prepojené priehradovými nosníkmi a v pozdĺžnych stranách sú zavetrované krížovými stužidlami z ťahadiel Macalloy [23].



Obr. 22 3D vizualizácia WERK ARENY Trinec [23]



Obr. 23 Model OK WERK ARENY v Trinci – priečný smer [23]



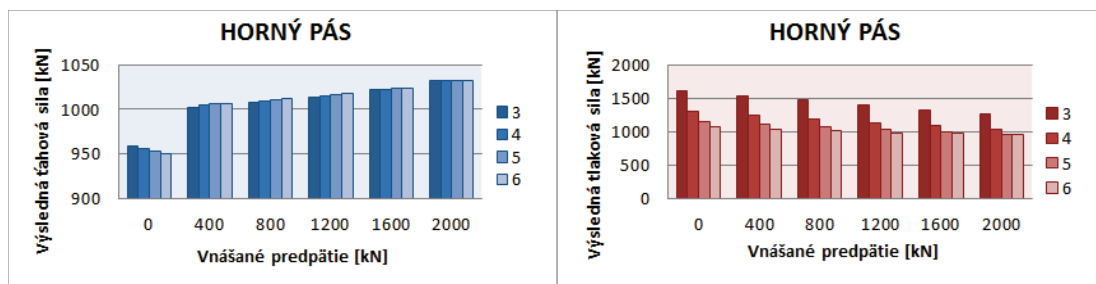
Obr. 24 Model OK WERK ARENY v Trinci – pozdĺžny smer [23]

4.2 Pôsobenie predpätia v rovinnom väzníku

V tejto podkapitole sa budeme venovať vplyvu predpínania na zmenu normálových síl v prípade priehradového väzníka pôsobiaceho iba v rovine. K štúdii nám posluží väzník zobrazený na obr. 25, ktorý bol navrhnutý v podobnom duchu ako hlavný nosný prvok priečnej väzby zastrešenia spomínanej WERK ARENY v Trinci.

Na príklade časti priehradovej konštrukcie s predpätými diagonálami na začiatku predchádzajúcej kapitoly sme si ukázali, že rozloženie vnútorných síl v konštrukcii od vnášaného predpätia je závislé na uhle, ktorý zvierá predpínaný prvok s ostatnými prvkami konštrukcie. V nasledujúcej štúdii sa preto zameriame aj na to, ako sa budú vyvíjať vnútorné sily od predpätia za predpokladu, že vzpery vzpínadla budú mať 3, 4, 5 alebo 6 m. Tvar a rozmery riešených variantov väzníka sú zobrazené na obr. 25.

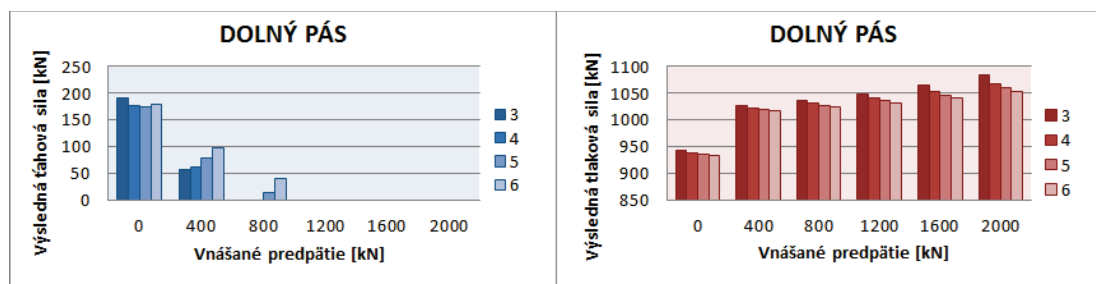
Horný pás



Obr. 27 Vývoj normálových síl v hornom páse

Horný pás väzníka je pre prípad zaťaženia vztlakom vetra ťahaný a tým pádom s aplikovaným predpätím cez vzpínadlo bude jeho výsledná ťahová sila narastať spolu so zväčšujúcim sa predpätím. V prípade opačne pôsobiaceho zaťaženia bude horný pás tlačný, pričom vyššie predpätie bude spôsobovať znižovanie tlakovej sily, čo je výhodné pre dimenzovanie prierezu pásu. Zároveň záporná normálová sila je tým menšia, čím vyššie sú vzpery vzpínadla.

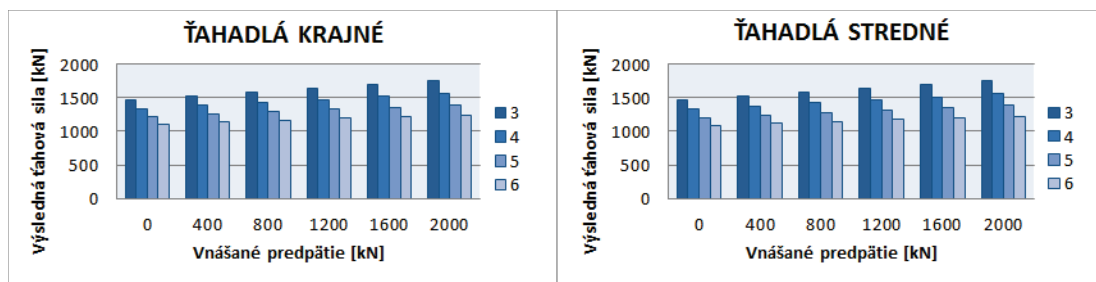
Dolný pás



Obr. 28 Vývoj normálových síl v dolnom páse

Z grafu vidíme, že dolný pás môže byť ťahaný iba v prípade bez predpätia, alebo iba s relatívne malým predpätím. Jeho bežné tlakové namáhanie zapríčiňuje už samotný tvar väzníka a s narastajúcim predpätím je do neho vnášaná ďalšia tlaková sila. Pritom platí, že čím plochejší tvar vzpínadla, tým je výsledná sila väčšia.

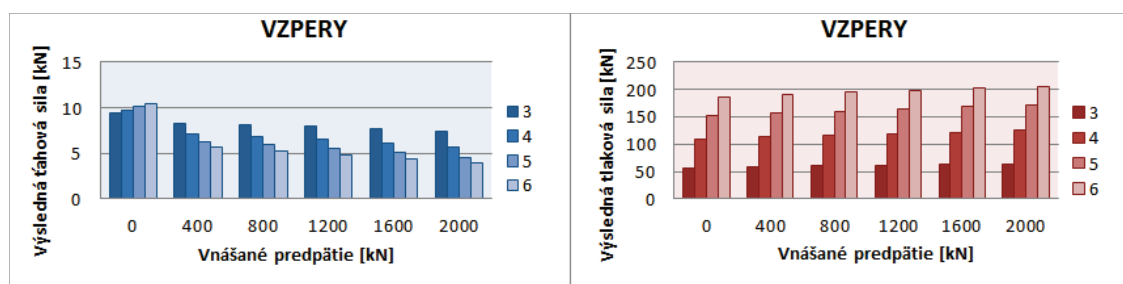
Ťahadlá



Obr. 29 Vývoj ťahových síl v ťahadlách

S rastúcim predpätím sa zvyšuje aj výsledná ťahová sila v ťahadlách. Jej nárast je však v porovnaní s vnášanou silou len nepatrný. Ide o to, že zaťaženie predpätím, ktoré sa v programe SCIA Engineer 16.1 zadáva silovou veličinou v kN, sa prepočíta na dĺžkovú deformáciu prvku, ktorou sa následne konštrukcia zaťaží. To znamená, že veľkosť tohto zaťaženia je závislá na osovej tuhosti prúta. A keďže nami uvažované ťahadlo Macalloy M100 je relatívne veľmi tuhé, nárast výsledného ťahového namáhania je v porovnaní s nárastom predpínacej sily veľmi malý.

Vzpery



Obr. 30 Vývoj normálových síl vo vzperách

Tieto prúty môžu byť namáhané zanedbateľným ťahom v prípade dominantného zaťaženia vztlakom vetra. Obyčajne sú to ale prvky namáhané tlakom. Z grafu je zrejmé, že pri pôsobení gravitačného zaťaženia je vplyv narastajúceho predpätia na zmenu ich výsledného namáhania takmer zanedbateľný. Na druhej strane ale vidíme, že dvojnásobná výška vzpier spôsobí zhruba trojnásobný nárast výslednej tlakovej sily.

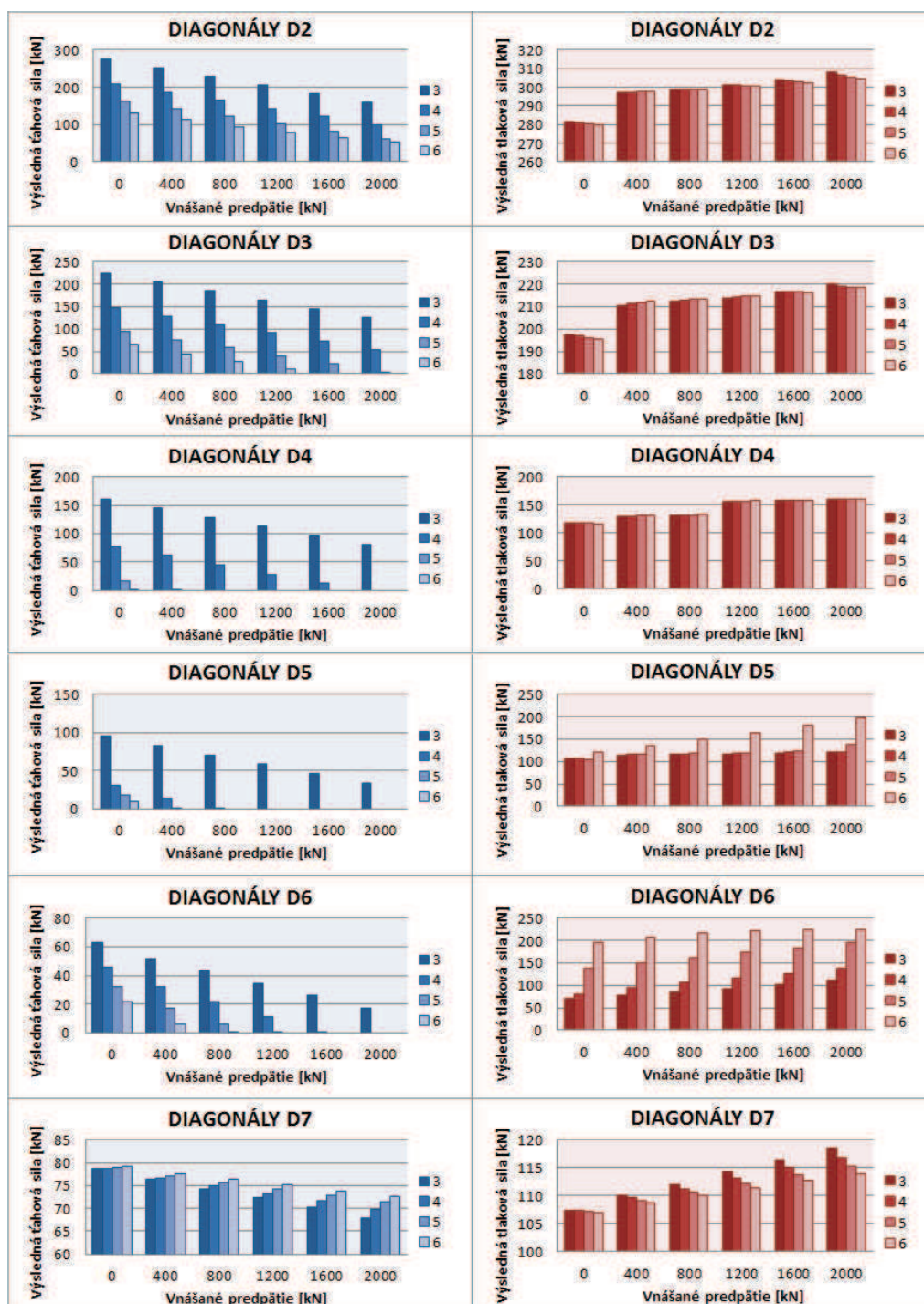
Diagonály

Prvá krajná diagonála je za akýchkoľvek podmienok zaťaženia ťahaná a jej namáhanie ostáva takmer nemenné či už v prípade nulovej alebo maximálnej predpínacej sily (rozdiel síl kolísal o hodnotu ± 1 kN).

Diagonály D2 až D6 sa v prípade ťahového namáhania správajú podobne. Platí, že čím je diagonála bližšie okraja väzníka, tým je namáhaná väčším ťahom, a čím je aplikované predpätie väčšie, tým sa tento ťah znižuje. Zároveň je očividné, že čím je vzpínadlo plochejšie, tým sú ťahové sily v diagonálach väčšie.

Pri tlakovom namáhaní týchto prvkov platí, že s narastajúcim predpätím sa jeho veľkosť mení len nepatrne, podobne ako nepatrný je vplyv výšky vzpínadla. Výnimku tvoria diagonály D6, ktoré sú viac namáhané pri väčších dĺžkach vzpier. Súvisí to s faktom, že tieto diagonály sa stretávajú v spoločnom styčníku s tlačnými vzperami.

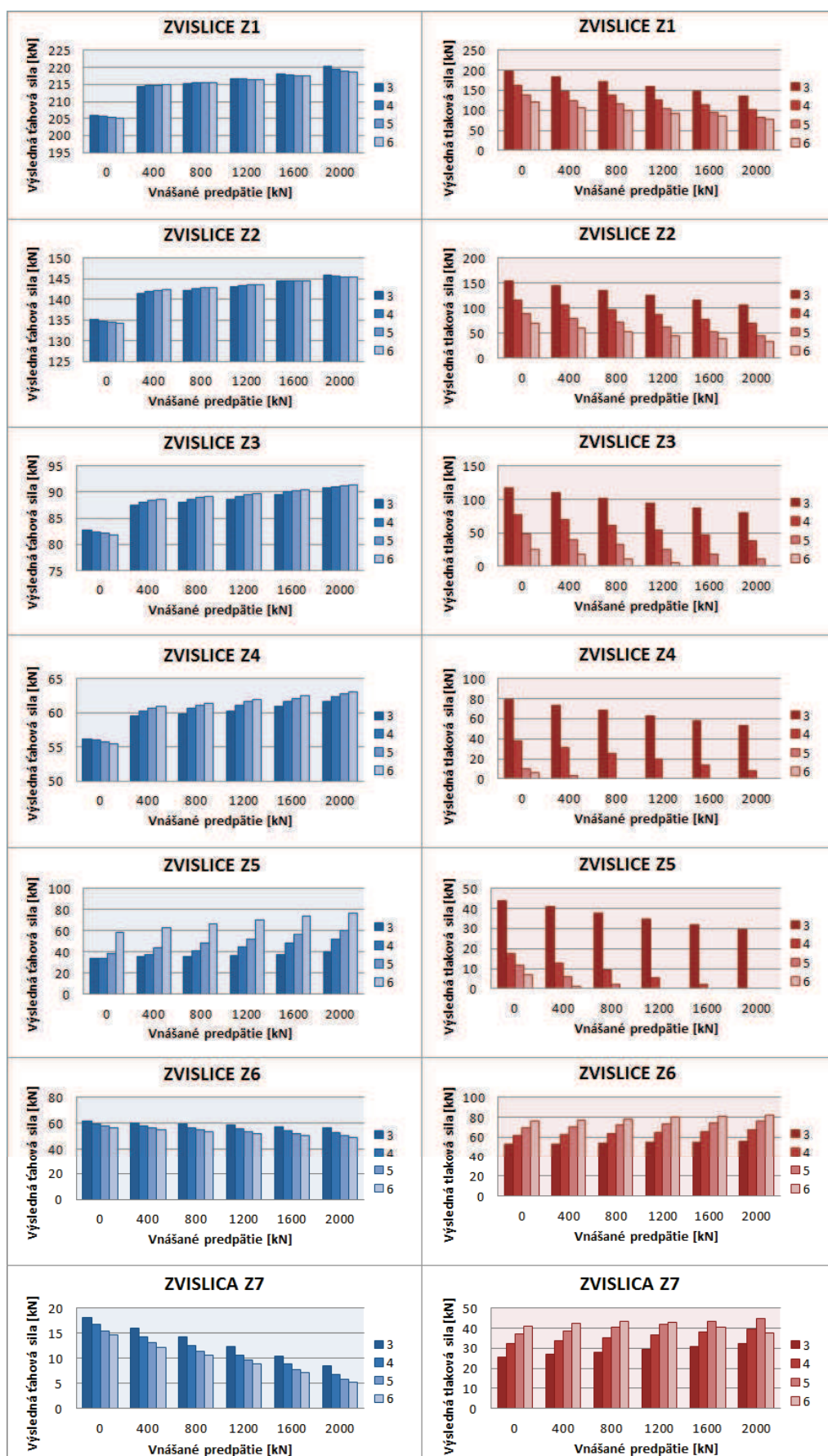
Rozdielne priebehy vnútorných síl majú diagonály D7, ktoré sú umiestnené vo vrchole väzníka medzi vzperami. U nich na rozdiel od ostatných diagonál zaznamenávame miernejší nárast ťahového, resp. pokles tlakového namáhania s rastúcou výškou vzpínadla.



Obr. 31 Vývoj normálových síl v diagonálach

Zvislice

Zjednodušene môžeme povedať, že u všetkých zvislíc zaznamenávame len malú zmenu vo výslednom ťahovom namáhaní od zvyšujúcej sa predpínacej sily. Naopak, väčšia predpínacia sila priaznivo pôsobí na zmenšovanie tlakového namáhania zvislíc. Zároveň pre prvky Z1–Z5 platí, že čím je vzpínadlo vyššie, tým je tlakové namáhanie menšie. Pre zvislice Z6 a Z7 (prvky medzi vzperami) platí opačné tvrdenie.



Obr. 32 Vývoj normálových síl vo zvisliciach

Zhodnotenie

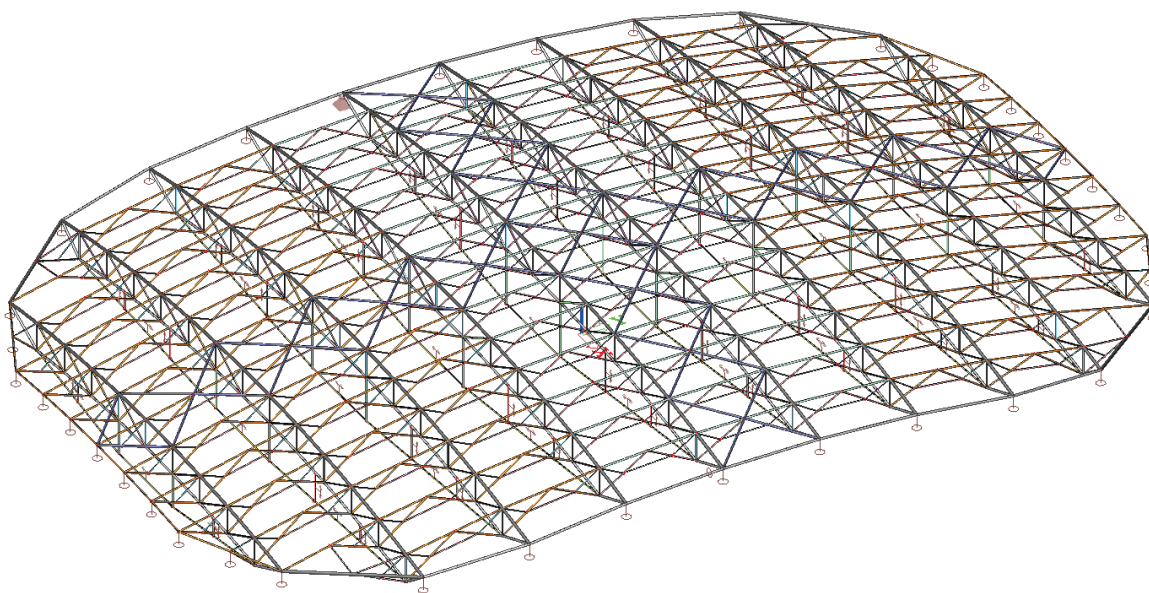
Na základe údajov získaných v tejto parametrickej štúdii sa ukázalo, že počiatočné predpätie má vplyv na výsledné prerozdelenie vnútorných síl. Faktom je, že priaznivý vplyv predpätia sa na tomto príklade prejavil iba na hornom páse a zvisliciach, kde v oboch prípadoch so zvyšujúcim sa predpätím sa buď zvyšovala ťahová, a teda stabilizačná sila v spomínaných prvkoch, alebo sa znižovala tlaková – destabilizačná sila. V prípade horného pásu bolo toto zmenšenie tlakovej sily o cca 13–30%, čo vzhľadom na fakt, že je to najnamáhanejší prvok v konštrukcii (okrem ťahadiel), môže priaznivo ovplyvniť ekonomickú stránku návrhu konštrukcie. V ostatných prútoch ale zaznamenávame opačný vývoj veľkosti osových síl, čo, naopak, znižuje hospodárnosť návrhu.

Iné pozitívum predpínania vidíme v celkovej tuhosti konštrukcie, ktorá sa premieta do jej celkovej deformácie, resp. do posunov jednotlivých styčníc. Pri vztlačovom zaťažení od vetra sa naša konštrukcia s maximálnym predpätím oproti tej nepredpätej deformuje o cca 10%, a pri gravitačnom zaťažení sú zvislé posuny menšie zhruba o polovicu.

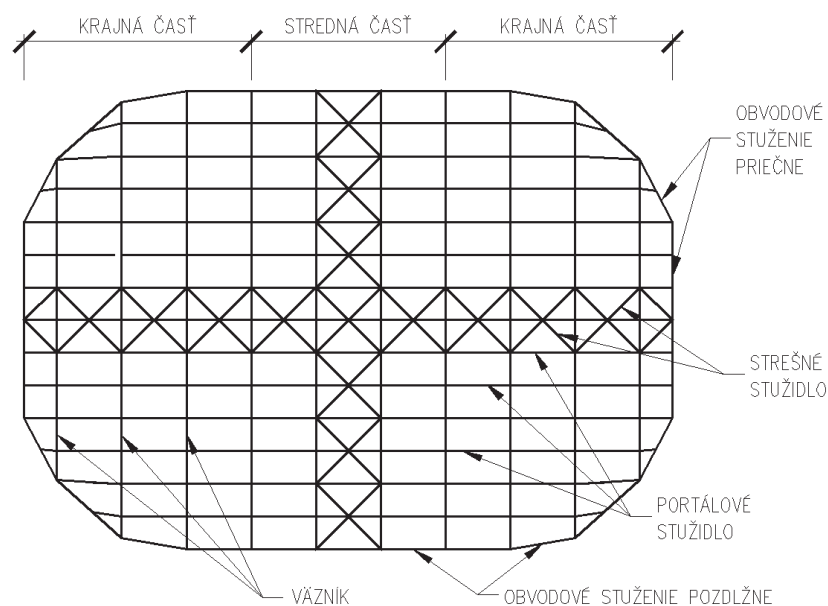
4.3 Pôsobenie predpätia v priestorovej konštrukcii

Z parametrickej štúdie rovinného väzníka vyplýva, že vplyv narastajúceho predpätia vnášaného do konštrukcie má prevažne negatívne účinky, keďže spôsobuje zväčšovanie tlakových namáhání väčšiny prvkov.

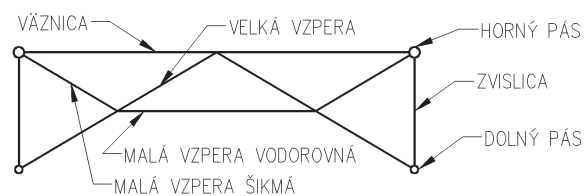
Podobná štúdia bola preto urobená aj na priestorovom modeli celej strešnej konštrukcie, a tu sa už dostavili výrazné pozitívne výsledky predpínania oceľového vzpínadla. V tomto prípade sme uvažovali s konkrétnym zaťažením spočítaným pre konkrétny model zastrešenia, ktorého návrh bol predmetom samostatnej 5. kapitoly.



Obr. 33 Výpočtový model pre parametrickú štúdiu



Obr. 34 Schematický popis konštrukcie



Obr. 35 Prvky portálového stužidla

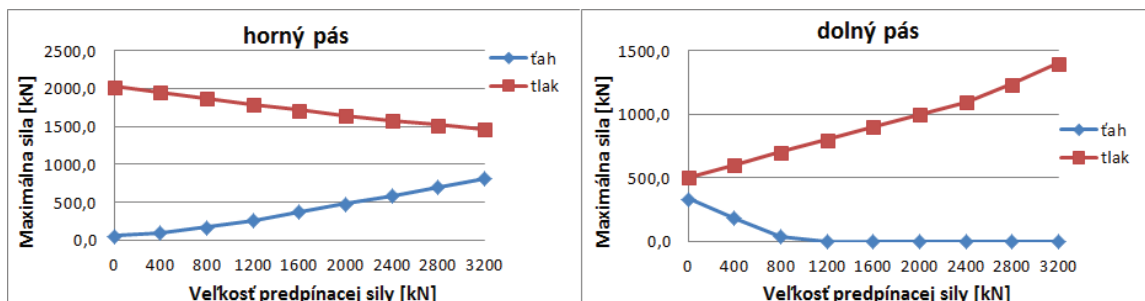
V nasledujúcej tabuľke sú uvedené maximálne normálové sily v jednotlivých prvkoch priestorovej konštrukcie od príslušnej predpínacej sily. Aj v tomto prípade sme uvažovali s nárastom sily v krokoch po 400 kN od nulového predpätia po hodnotu 3200 kN v každom krajnom ťahadle. Okrem toho sme uvažovali s rozdielnou výškou vzpier pre jednotlivé väzníky (podobne ako v skutočnej konštrukcii). Výška vzpier vzpínadiel postupne narastá od krajných väzníkov, kde má hodnotu 3,0 m, vždy o 0,5 m, až dosiahne hodnotu 5,0 m v dvoch stredových väzníkoch.

Tab. 2 Výsledné maximálne normálové sily v závislosti na veľkosti predpätia

prút		maximálne ťahové sily [kN]										maximálne tlakové sily [kN]									
		predpínacia sila [kN]										predpínacia sila [kN]									
		0	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200		0	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200	
horný pás		55,9	101,9	171,6	260,9	368,5	479,0	589,5	700,0	810,3		2025,8	1947,8	1870,1	1792,4	1715,2	1638,2	1576,3	1522,5	1489,5	
dolný pás		332,7	183,5	34,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		505,1	603,0	701,1	799,2	897,6	996,0	1094,6	1235,1	1400,7	
diagonály	1	1547,9	1542,1	1536,2	1530,4	1524,5	1518,7	1512,8	1506,9	1500,8		35,4	40,8	46,2	51,5	56,8	62,1	67,4	72,6	77,8	
	2	359,1	330,2	301,3	277,5	269,5	261,6	253,8	246,2	238,5		41,0	70,4	99,7	129,1	158,5	187,7	217,1	246,4	275,6	
	3	276,4	249,8	223,1	205,0	196,6	188,3	180,1	172,0	163,9		0,0	26,5	56,1	85,8	115,5	145,2	174,8	204,5	234,1	
	4	162,3	139,7	117,2	101,0	88,5	76,1	63,6	51,3	39,0		0,0	17,6	43,4	69,2	94,9	120,7	146,4	172,1	197,8	
	5	64,7	60,2	58,2	43,5	18,7	0,0	0,0	0,0	0,0		57,5	80,5	104,6	128,8	152,9	177,1	201,3	225,5	249,7	
	6	64,2	45,0	26,3	7,6	1,4	9,7	18,2	26,7	35,4		167,0	186,0	204,0	222,0	240,2	258,5	276,3	292,8	305,9	
	7	122,5	118,6	114,7	110,7	106,8	102,8	98,7	95,6	105,7		80,5	83,6	87,6	91,5	95,5	99,5	103,5	107,5	111,6	
zvislice	1	38,9	58,2	73,0	90,0	107,0	123,9	140,7	157,5	174,3		273,0	255,5	238,1	220,7	203,8	187,3	180,0	174,1	168,3	
	2	22,5	26,2	34,7	43,2	51,6	60,0	68,4	76,7	84,9		175,9	166,8	157,7	152,9	151,4	150,0	148,6	147,3	146,0	
	3	10,7	23,9	47,9	74,5	101,2	127,9	154,6	181,3	208,1		228,1	201,5	174,9	160,3	146,6	133,1	119,5	106,0	92,6	
	4	53,6	53,8	54,0	54,0	58,8	72,3	85,9	99,3	112,8		154,2	141,0	127,9	114,8	101,8	88,8	75,9	63,1	50,4	
	5	45,7	52,1	58,5	64,9	76,9	98,1	119,3	140,5	161,6		172,5	150,8	129,2	107,5	85,9	64,3	42,8	21,8	5,7	
	6	13,8	24,4	36,8	54,7	72,5	90,4	108,2	126,1	143,9		252,1	234,0	223,1	212,2	201,3	190,4	179,6	168,9	158,4	
	7	0,0	7,5	24,8	42,1	59,3	76,6	93,8	111,0	128,2		234,4	216,9	199,3	181,7	165,0	154,4	143,9	133,5	123,3	
väznice	v strede	265,9	254,7	243,5	232,3	221,2	210,0	198,9	190,9	196,8		193,3	177,9	162,5	147,0	131,5	115,9	100,3	93,0	104,0	
	na krajoch	36,6	55,5	88,6	123,5	159,5	195,6	231,7	267,9	304,3		306,5	272,1	237,7	203,2	168,7	134,1	103,4	76,4	56,6	
port. stuž. veľké	v strede	82,6	75,6	68,6	61,6	54,6	59,2	64,8	77,7	87,0		64,8	57,6	50,4	43,1	35,9	38,8	46,1	53,4	60,7	
	na krajoch	225,0	204,0	183,0	161,9	140,9	122,2	104,4	118,0	138,8		161,3	142,6	123,8	104,8	110,0	145,8	181,8	217,9	254,0	
portálové stužidlo malé	stred vodor.	94,3	86,6	78,9	71,6	87,4	103,2	119,1	135,0	150,9		89,5	75,6	61,7	47,7	40,0	46,3	54,5	62,7	71,0	
	stred šikmé	58,4	53,9	49,3	44,7	52,5	61,7	70,9	80,1	89,3		51,6	43,4	35,1	26,8	21,2	26,0	30,8	35,7	40,6	
	krajné vodor.	327,2	301,0	274,8	248,6	222,5	196,4	170,3	144,3	118,4		68,0	61,6	54,9	48,2	42,9	37,1	31,9	26,8	21,8	
	krajné šikmé	202,9	186,9	170,9	155,0	139,0	123,0	107,0	91,1	75,2		40,9	36,8	32,5	28,2	24,1	20,0	16,0	13,0	10,0	
obvodové stuženie	pozdĺžne	576,4	526,3	476,1	425,8	375,3	324,7	274,1	223,3	172,5		0,0	33,5	100,1	167,0	234,0	301,1	368,4	435,8	503,2	
	priečne	299,8	264,0	228,0	192,0	155,9	119,7	83,4	47,1	10,8		0,0	33,5	32,4	69,2	106,2	143,2	180,3	217,5	254,7	
strešné stužidlo		40,1	45,1	64,8	84,4	104,8	127,8	153,0	178,2	203,3		394,3	370,2	346,2	322,2	298,1	274,2	250,2	226,2	218,7	
vzpery		0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		243,3	248,3	253,4	258,4	263,5	268,7	273,8	278,9	283,7	
ťahadlá		1870,8	1916,5	1962,2	2007,9	2053,6	2098,2	2144,8	2190,1	2234,6		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Pre lepšiu prehľadnosť boli priebehy zmien vo výsledných normálových silách premietnuté do nasledujúcich grafov:

Horný a dolný pás väzníkov

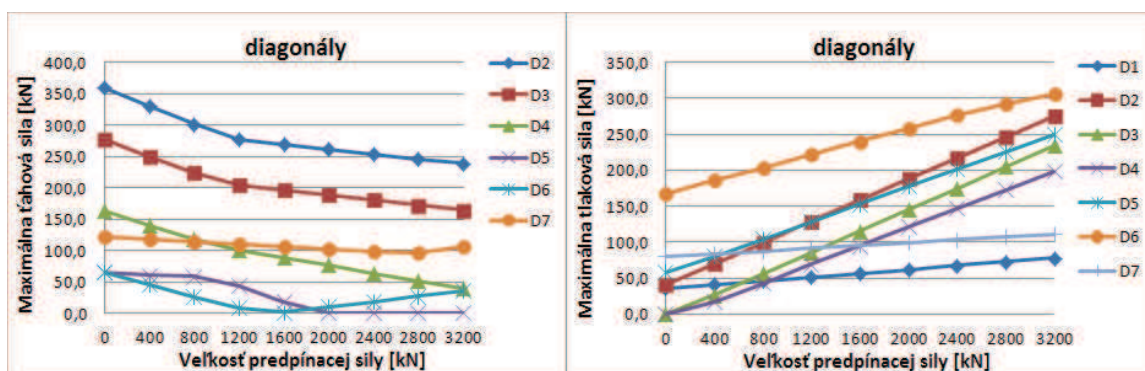


Obr. 36 Normálové sily v hornom a dolnom páse väzníkov

S rastúcim predpäťm je horný pás väzníkov odľahčovaný a vidíme, že v prípade nami uvažovanej maximálnej predpínacej sily jeho tlakové namáhanie klesne o cca 25%. Zároveň narastá prípadné ťahové namáhanie, ale jeho veľkosť sa bezpečne pokryje únosnosťou prierezu v tlaku.

Opačný vplyv má predpäťtie na dolný pás väzníka, kde jeho tlakové namáhanie ešte viac narastá (takmer o 200%!) a eliminuje sa možnosť ťahového namáhania. Tento jav je však prirodzeným dôsledkom vyplývajúcim z danej geometrie väzníka so vzpínadlom.

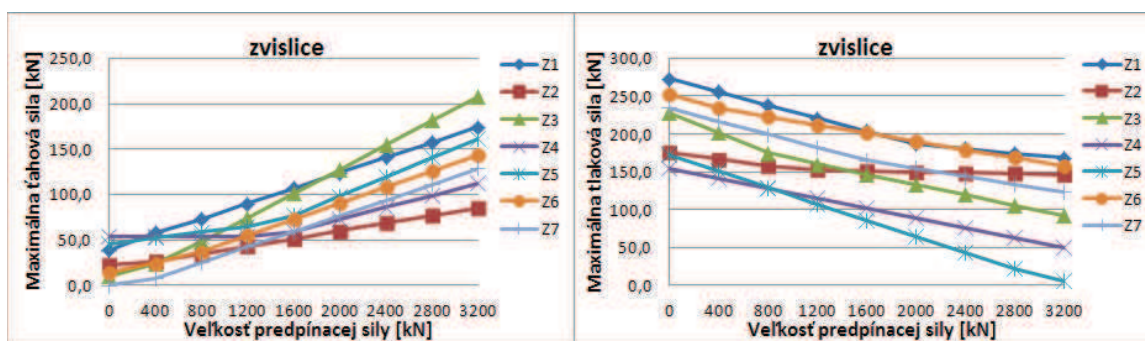
Diagonály



Obr. 37 Normálové sily v diagonálach väzníkov

Diagonály ako prvky väzníka sa aj v 3D modeli správajú podobne ako v rovinnom prípade popísanom v podkapitole 4.2. Čím väčšie je vnášané predpäťtie, tým viac klesá ťahové a narastá ich tlakové namáhanie.

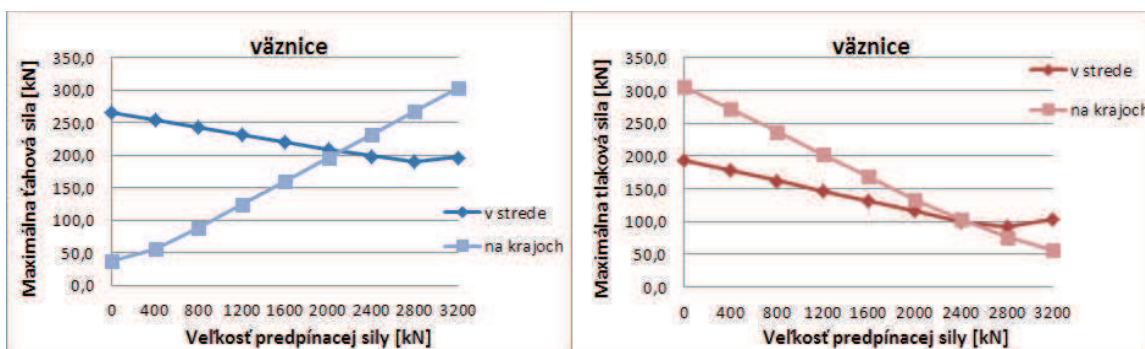
Zvislice



Obr. 38 Normálové sily vo zvisliciach väzníkov

V prípade zvislíc je vplyv predpätia na ich vnútorné sily podobný ako v rovinnom prípade: narastá ťahové a priaznivo klesá tlakové namáhanie.

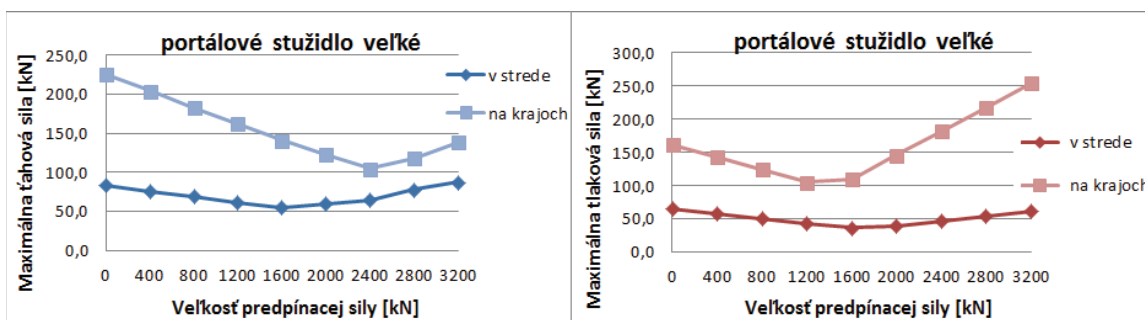
Väznice



Obr. 39 Normálové sily vo väzniciach portálových stužidiel

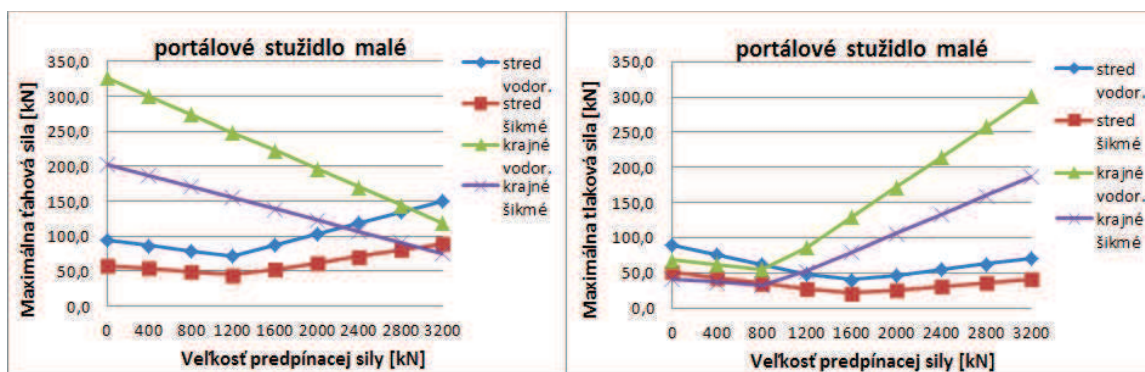
Na zmene síl vo väzniciach vidíme prvé významné pozitívum predpínania vzpínadiel rovinných väzníkov zakomponovaných do priestorového spolupôsobenia. U väzníc v troch stredných poliach dochádza nielen k miernemu poklesu ťahových síl, ale zároveň aj k významnému poklesu pre návrh rozhodujúcich tlakových síl. V ostatných väzniciach výraznejšie narastá ťahová sila, ale čo je dôležitejšie, výrazne klesá tlaková sila.

Portálové stužidlo



Obr. 40 Normálové sily vo veľkých vzperách portálových stužidiel

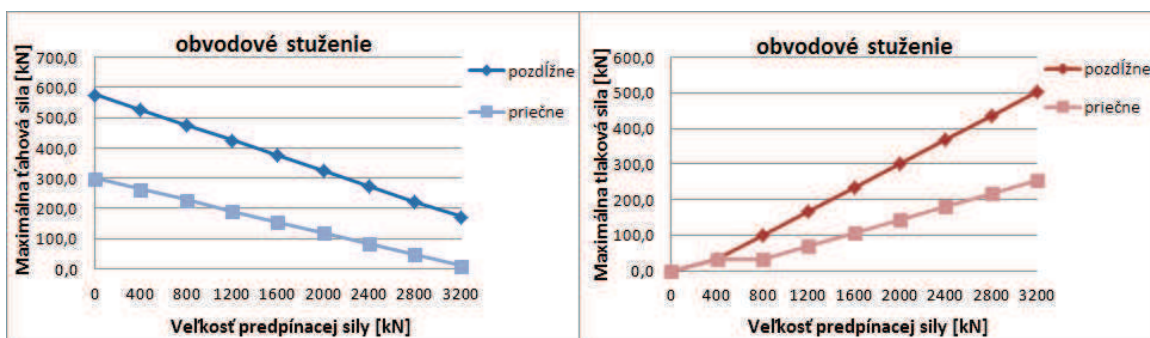
V dominantných prvkoch portálového stužidla v strednom páse najprv mierne klesá ako ťahová, tak i tlaková sila, potom naspäť mierne stúpa. Zlomovým bodom v tomto prípade je hodnota predpätia 1600 kN. Výraznejšie zmeny sa ukazujú v ostatných častiach konštrukcie, kde ťahová sila klesá po hodnotu predpätia 2400 kN a potom opäť rastie rovnakým tempom, v prípade tlakovej sily zaznamenávame pokles iba po predpätie rovné 1200 kN, od tejto hodnoty tlakové namáhanie rastie výraznejšie.



Obr. 41 Normálové sily v malých vzperách portálových stužidiel

V malých rozperách portálových stuždiel dochádza k podobným zmenám ako u hlavných prvkov stužidla. V strednej časti strechy ťahové i tlakové sily najprv mierne klesajú a od určitého bodu naspäť narastajú. Pre ťah je týmto bodom 1200 kN, pre tlak 1600 kN.

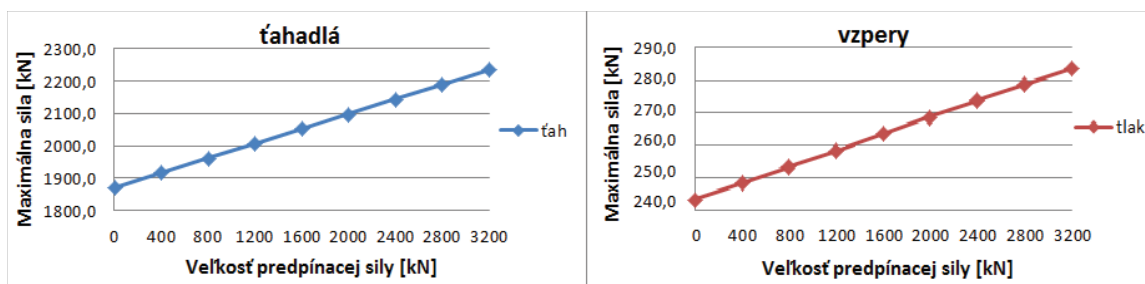
Obvodové stuženie



Obr. 42 Normálové sily v prútoch obvodového stuženia

So zvyšujúcim sa predpätím sa primárne ťahové namáhanie prvkov obvodového stužidla postupne zmenšuje a začína sa objavovať a narastať tlaková sila. Čím viac konštrukciu predpínáme, tým väčšie tlaky vnášame najmä do stužidla pozdĺž dlhšieho rozmeru haly.

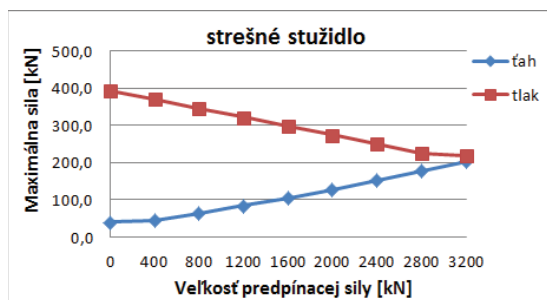
Ťahadlá a vzpery



Obr. 43 Normálové sily v ťahadlách a vzperách

Pri zvyšovaní predpätia sa prirodzene zvyšuje aj ťahové namáhanie ťahadiel a tým sa vnášajú väčšie tlaky do vzpier vzpínadiel. Tento nárast však nie je príliš dramatický v porovnaní s nárastom tlakových síl v iných prvkoch konštrukcie.

Strešné stužidlo



Obr. 44 Normálové sily v prútoch strešného stužidla

Nárast predpätia odľahčuje dominantné tlakové namáhanie strešného stužidla v oboch osiach haly a viac mu dovoľuje ťahové namáhanie.

Zhodnotenie

Na predchádzajúcich grafoch boli zobrazené priebehy zmien vnútorných síl závislé na veľkosti predpätia, z ktorých celkom jednoznačne vyplývajú pozitíva predpínania, a síce pokles rozhodujúcich tlakových síl vo väčšine prvkov. Otázkou zostáva, ako vyhodnotiť jeho celkový vplyv pre optimálny návrh konštrukcie. V nasledujúcej tabuľke je ukázaný príklad, ako zhodnotiť efektívnosť predpínania, resp. ako stanoviť takú hraničnú hodnotu predpätia, pre ktorú má ešte predpínanie zmysel.

Dôležité hodnoty pre vyjadrenie vplyvu predpätia na zmenu normálových síl v konštrukcii sú zobrazené v stĺpcoch s podfarbením. Číslo menšie ako 1 znamená, že výsledná sila v predpätej konštrukcii je menšia ako v nepredpätej a jeho hodnota vyjadruje pomer medzi týmito dvoma silami. Čím je číslo menšie, tým výraznejšia klesla nová sila oproti pô-

vodnej. Dôležité sú predovšetkým tlakové sily, ktorých pokles znamená možnosť navrhnuť štíhlejšie prvky a tým pádom urobiť ekonomickejší návrh konštrukcie.

Tab. 3 Porovnanie vybraných výsledných síl so silami v nepredpätej konštrukcii

prút		ŤAHOVÉ SILY							TLAKOVÉ SILY						
		N ₀ [kN]	N ₁₆₀₀ [kN]	N ₁₆₀₀ -N ₀ [kN]	N ₁₆₀₀ /N ₀₀ [-]	N ₃₂₀₀ [kN]	N ₃₂₀₀ -N ₀ [kN]	N ₃₂₀₀ /N ₀ [-]	N ₀ [kN]	N ₁₆₀₀ [kN]	N ₁₆₀₀ -N ₀ [kN]	N ₁₆₀₀ /N ₀₀ [-]	N ₃₂₀₀ [kN]	N ₃₂₀₀ -N ₀ [kN]	N ₃₂₀₀ /N ₀ [-]
horný pás		55,9	368,5	312,6	6,59	810,3	754,4	14,50	2025,8	1715,2	-310,6	0,85	1469,5	-556,3	0,73
dolný pás		332,7	0,0	-332,7	0,00	0,0	-332,7	0,00	505,1	897,6	392,5	1,78	1400,7	895,6	2,77
diagonály	1	1547,9	1524,5	-23,4	0,98	1500,8	-47,1	0,97	35,4	56,8	21,4	1,60	77,8	42,4	2,20
	2	359,1	269,5	-89,6	0,75	238,5	-120,6	0,66	41,0	158,5	117,5	3,87	275,6	234,6	6,72
	3	276,4	196,6	-79,8	0,71	163,9	-112,5	0,59	0,0	115,5	115,5	-	234,1	234,1	-
	4	162,3	88,5	-73,8	0,55	39,0	-123,3	0,24	0,0	94,9	94,9	-	197,8	197,8	-
	5	64,7	18,7	-46,0	0,29	0,0	-64,7	0,00	57,5	152,9	95,4	2,66	249,7	192,2	4,34
	6	64,2	1,4	-62,8	0,02	35,4	-28,8	0,55	167,0	240,2	73,2	1,44	305,9	138,9	1,83
	7	122,5	106,8	-15,7	0,87	105,7	-16,8	0,86	80,5	95,5	15,0	1,19	111,6	31,1	1,39
zvislice	1	38,9	107,0	68,1	2,75	174,3	135,4	4,48	273,0	203,8	-69,2	0,75	168,3	-104,7	0,62
	2	22,5	51,6	29,1	2,29	84,9	62,4	3,77	175,9	151,4	-24,5	0,86	146,0	-29,9	0,83
	3	10,7	101,2	90,5	9,46	208,1	197,4	19,45	228,1	146,6	-81,5	0,64	92,6	-135,5	0,41
	4	53,6	58,8	5,2	1,10	112,8	59,2	2,10	154,2	101,8	-52,4	0,66	50,4	-103,8	0,33
	5	45,7	76,9	31,2	1,68	161,6	115,9	3,54	172,5	85,9	-86,6	0,50	5,7	-166,8	0,03
	6	13,8	72,5	58,7	5,25	143,9	130,1	10,43	252,1	201,3	-50,8	0,80	158,4	-93,7	0,63
	7	0,0	59,3	59,3	-	128,2	128,2	-	234,4	165,0	-69,4	0,70	123,3	-111,1	0,53
vážnice	v strede	265,9	221,2	-44,7	0,83	196,8	-69,1	0,74	193,3	131,5	-61,8	0,68	104,0	-89,3	0,54
	na krajoch	36,6	159,5	122,9	4,36	304,3	267,7	8,31	306,5	168,7	-137,8	0,55	56,6	-249,9	0,18
port. stuž. veľké	v strede	82,6	54,6	-28,0	0,66	87,0	4,4	1,05	64,8	35,9	-28,9	0,55	60,7	-4,1	0,94
	na krajoch	225,0	140,9	-84,1	0,63	138,8	-86,2	0,62	161,3	110,0	-51,3	0,68	254,0	92,7	1,57
portálové stužidlo	stred vodor.	94,3	87,4	-6,9	0,93	150,9	56,6	1,60	89,5	40,0	-49,5	0,45	71,0	-18,5	0,79
	stred šikmé	58,4	52,5	-5,9	0,90	89,3	30,9	1,53	51,6	21,2	-30,4	0,41	40,6	-11,0	0,79
	krajné vodor.	327,2	222,5	-104,7	0,68	118,4	-208,8	0,36	68,0	129,0	61,0	1,90	300,9	232,9	4,43
	krajné šikmé	202,9	139,0	-63,9	0,69	75,2	-127,7	0,37	40,9	79,1	38,2	1,93	187,1	146,2	4,57
obvodové stuženie	pozdĺžne	576,4	375,3	-201,1	0,65	172,5	-403,9	0,30	0,0	234,0	234,0	-	503,2	503,2	-
	priečne	299,8	155,9	-143,9	0,52	10,8	-289,0	0,04	0,0	106,2	106,2	-	254,7	254,7	-
strešné stužidlo		40,1	104,8	64,7	2,61	203,3	163,2	5,07	394,3	298,1	-96,2	0,76	218,7	-175,6	0,55
vzpery		0,7	0,0	-0,7	0,00	0,0	-0,7	0,00	243,3	263,5	20,2	1,08	283,7	40,4	1,17
ťahadlá		1870,8	2053,6	182,8	1,10	2234,6	363,8	1,19							

Táto tabuľka nám zároveň hovorí, že predpínať *do nekonečna* nemusí mať vždy pozitívny efekt. Existuje hodnota predpätia, ktorej prekročenie by znamenalo vracanie sa k horším výsledným silám v konštrukcii. Okrem toho, veľkosť maximálnej predpínacej sily je limitovaná pevnosťou predpínaného prvku.

Pri porovnaní pomerov tlakových síl napríklad vidíme, že v prípade predpínania hodnotou 3200 kN dostávame horšie vzájomné pomery pre diagonály a malé prvky portálového stužidla ako keby sme napínali iba polovičnou silou. Naopak, väčšia predpínacia sila dáva lepšie výsledky pre zvislice a veľké prúty portálového stužidla v porovnaní s predpínacou silou 1600 kN.

Pri rozhodovaní, aká hodnota predpínacej sily by bola pre konštrukciu najvýhodnejšia, potom záleží na významnosti daného prvku a na počte kusov v konštrukcii. Na základe týchto údajov by sa mohla každému prvku priradiť jeho *váha významnosti* a pomocou nej by bolo možné určiť najvhodnejšie predpätie.

Okrem toho treba podotknúť, že prezentované sily boli získané z prípadov, kedy bolo do krajných ťahadiel všetkých väzníkov vnášané rovnaké predpätie. Určenie najvhodnejšej predpínacej sily v ťahadlách jednotlivých väzníkov je už zložitejšia úloha, ktorú by bolo vhodné riešiť optimalizačnými metódami.

4.3.1 Demonštrácia úspory materiálu

Zmenšovanie maximálnych tlakových síl prostredníctvom vnášaného predpätia dovoľuje návrh subtilnejších prierezov. Na ilustráciu úspory materiálu vďaka tomuto opatreniu boli urobené dva konkrétne návrhy pre predpínaciu silu 0 kN a 1600 kN tak, aby vyhovovali posúdeniu únosnosti na ťah a vzperný tlak. Výsledné hmotnosti jednotlivých celkov potom vygeneroval program SCIA Engineer 16.1.

Tab. 4 Porovnanie hmotnosti konštrukcie pri predpätí 0 kN a 1600 kN

prút	PREDPÄTIE 0 kN			TLAK		ŤAH		PREDPÄTIE 1600 kN			TLAK		ŤAH		
	návrh prierezu			návrh. sila	využitie prierezu	návrh. sila	využitie prierezu	návrh prierezu			návrh. sila	využitie prierezu	návrh. sila	využitie	
	priemer	hrúbka	plocha					priemer	hrúbka	plocha					
	d [mm]	t [mm]	A [mm ²]	N _{ed} [kN]	N _{ed} /N _{t,Rd}	N _{ed} [kN]	N _{ed} /N _{t,Rd}	d [mm]	t [mm]	A [mm ²]	N _{ed} [kN]	N _{ed} /N _{t,Rd}	N _{ed} [kN]	N _{ed} /N _{t,Rd}	
horný pás	244,5	12,5	9111	2025,8	0,71	810,3	0,25	219,1	10,0	6569	1715,2	0,76	368,5	0,14	
dolný pás	139,7	8,0	3310	505,1	0,71	0,0	0,00	177,8	8,0	4268	897,6	0,67	0,0	0,00	
diagonály	1	177,8	10,0	5272	35,4	0,02	1500,8	0,80	177,8	8,0	4268	56,8	0,13	1524,5	0,88
	2	101,6	4,0	1226	41,0	0,21	238,5	0,55	88,9	4,0	1067	158,5	0,87	269,5	0,68
	3	82,5	4,0	986	0,0	0,00	163,9	0,47	82,5	4,0	986	115,5	0,65	196,6	0,54
	4	70,0	4,0	829	0,0	0,00	39,0	0,13	70,0	4,0	829	94,9	0,71	88,5	0,30
	5	70,0	4,0	829	57,5	0,90	0,0	0,00	101,6	4,0	1226	152,9	0,63	18,7	0,04
	6	101,6	4,0	1226	167,0	0,91	35,4	0,08	114,3	4,5	1552	240,2	0,78	1,4	0,07
	7	88,9	4,0	1067	80,5	0,64	105,7	0,28	88,9	4,0	1067	95,5	0,77	106,8	0,28
zvislice	1	101,6	4,0	1226	273,0	0,74	174,3	0,40	82,5	4,0	986	203,8	0,68	107,0	0,25
	2	82,5	4,0	986	175,9	0,67	84,9	0,24	70,0	4,0	829	151,4	0,81	51,6	0,14
	3	82,5	4,0	986	228,1	0,87	208,1	0,59	70,0	4,0	829	146,6	0,70	101,2	0,21
	4	70,0	4,0	829	154,2	0,83	112,8	0,38	57,0	4,0	666	101,8	0,84	58,8	0,13
	5	70,0	4,0	829	172,5	0,93	161,6	0,55	57,0	4,0	666	85,9	0,63	76,9	0,26
	6	88,9	4,0	1067	252,1	0,85	143,9	0,38	70,0	4,0	829	201,3	0,86	72,5	0,18
	7	88,9	4,0	1067	234,4	0,79	128,2	0,34	70,0	4,0	829	165,0	0,74	59,3	0,11
vážnice	v strede	114,3	5,0	1717	193,3	0,80	196,8	0,32	101,6	4,0	1226	131,5	0,55	221,2	0,53
	na krajoch	139,7	5,0	2116	306,5	0,77	304,3	0,41	101,6	4,0	1226	168,7	0,75	159,5	0,23
port. stuž.	v strede	101,6	4,0	1226	64,8	0,62	87,0	0,20	82,5	4,0	986	35,9	0,38	54,6	0,06
veľké	na krajoch	127,0	5,0	1916	161,3	0,77	138,8	0,20	101,6	4,0	1226	110,0	0,85	140,9	0,26
portálové	stred vodor.	82,5	4,0	986	89,5	0,69	150,9	0,43	57,0	4,0	666	40,0	0,65	87,4	0,14
stužidlo	stred šikmé	57,0	4,0	666	51,6	0,78	89,3	0,38	42,4	4,0	483	21,2	0,59	52,5	0,12
malé	krajné vodor.	88,9	4,0	1067	68,0	0,44	118,4	0,31	70,0	4,0	829	129,0	0,79	222,5	0,53
	krajné šikmé	57,0	4,0	666	40,9	0,72	75,2	0,32	57,0	4,0	666	79,1	0,65	139,0	0,41
obvodové	pozdĺžne	127,0	5,0	1916	0,0	0,00	172,5	0,25	139,7	8,0	3310	234,0	0,83	375,3	0,22
stuženie	priečne	101,6	4,0	1226	0,0	0,00	10,8	0,02	101,6	4,0	1226	106,2	0,50	155,9	0,17
strešné stužidlo		177,8	5,6	3030	394,3	0,79	203,3	0,19	139,7	8,0	3310	298,1	0,77	104,8	0,08
vzpery		139,7	5,0	2116	243,3	0,75	0,0	0,00	127,0	5,6	2136	263,5	0,85	0,0	0,00
ťahadlá		97,0	97,0	7390	0,0	-	2234,6	0,58	97,0	97,0	7390	0	-	2053,6	0,57
CELKOVÁ HMOTNOSŤ (BEZ ŤAHADIEL) [kg]:	116 901,90							94 696,60							
percentuálny podiel:	100%							81%							

Vidíme, že pri využití predpínacej sily 1600 kN klesne hmotnosť materiálu tuhých prvkov o 22,2 t, čo je zhruba 19% hmotnosti konštrukcie, ktorá by bola navrhnutá bez predpätia.

5 Návrh konštrukcie zastrešenia veľkorozponového objektu s využitím predpätej ocelevej konštrukcie so vzpínadlami

5.1 Model navrhnutej konštrukcie

Podstata výpočtového modelu konštrukcie zastrešenia veľkorozponového objektu vychádza z reálnej konštrukcie zastrešenia WERK ARENY v Trinci, avšak s niekoľkými zjednodušeniami. Výpočtové modely pre obe uvedené parametrické štúdie boli použité práve z tohto modelu.

Tvar zastrešenia zostáva rovnaký – guľový vrchlík, ktorého polomer bol odhadnutý na 150 m. Maximálne rozpätie priehradového väzníka je 60 m pri vzopätí 3 m a pri výške väzníka 2,5 m. Rozpätia dvoch krajných väzníkov sú zmenšené na 57 a 42,9 m.

Dĺžka zastrešenia je 85 m, čo zodpovedá rozloženiu desiatich priečných väzieb v konštantnej vzdialenosti 8,5 m, pričom na oboch koncoch haly uvažujeme s *previsnutými koncami* dĺžky 4,25 m (obr. 45). Pre podrobnejšie informácie viď grafickú prílohu.

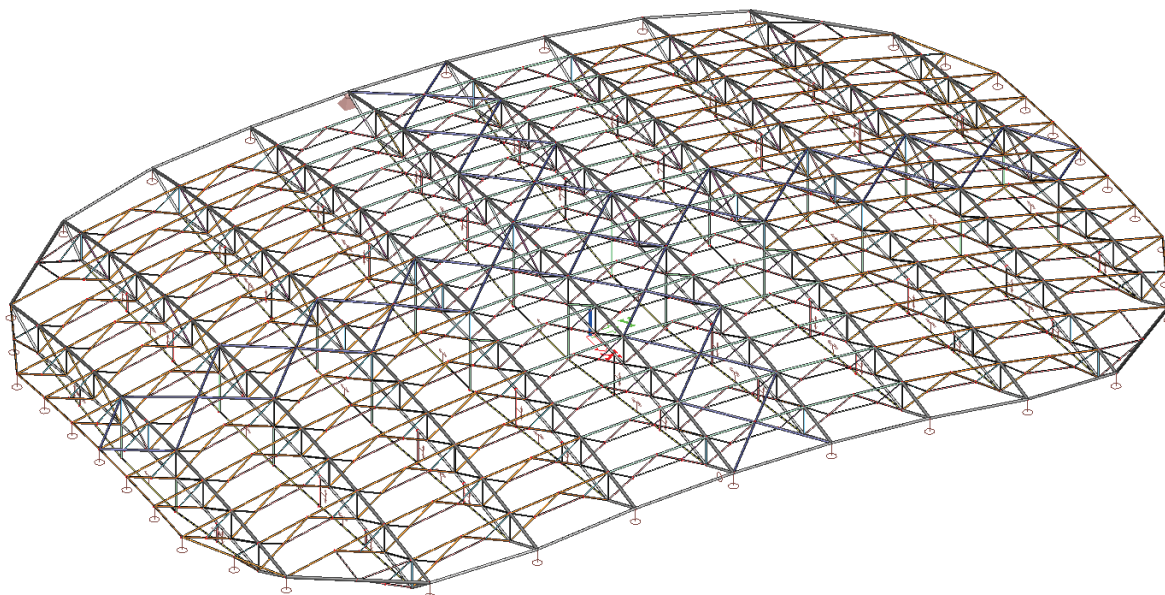
Základné zjednodušenie spočíva v tom, že vo výpočtovom modeli uvažujeme iba so strešnou konštrukciou ohraničenou vnútornými stĺpmi – bez predĺžených častí, ktoré kryjú komunikačné a iné priestory v priečnom smere. V reálnej konštrukcii sú tieto časti navrhnuté ako samostatne uložené prosté nosníky, ale nakoľko pri analyzovaní predpätia v konštrukcii nezohrávajú žiadnu úlohu, z riešeného modelu boli vypustené. Taktiež model nezahŕňa prvky kývných stojok, pomocou ktorých je reálna konštrukcia osadená na železobetónovú konštrukciu haly. V tomto projekte je v mieste osadenie väzníka a previsnutých koncov v pozdĺžnom smere namodelovaná podpera, ktorej návrh je mimo rámec tejto práce.

Hlavnú nosnú konštrukciu aj v našom prípade tvorí 10 rovinných priehradových väzníkov s predpäťmi vzpínadlami, ktoré sú vzájomne pospájané portálovými stužidlami v úrovni horných i dolných pásov. Portálové stužidlá nielen zabezpečujú priestorové spolupôsobenie celej nosnej konštrukcie strechy, ale aj stabilizujú väzník proti vybočeniu zo svojej roviny. Horné rúrky portálových stužidiel zároveň slúžia ako väznice, na ktoré je pripevnený trapézový plech skladaného strešného plášťa srkze privarené oceľové pásy.

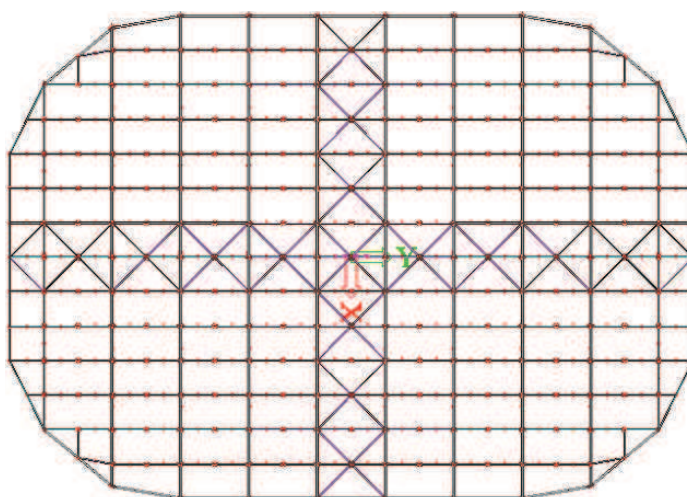
Priestorová stabilita a celková tuhosť konštrukcie je zaistená krížovým stužidlom z dutých rúrok vedeným v úrovni horných pásov v oboch osiach haly. Oba krajné väzníky sú v pozdĺžnom smere podopierané v styčníkoch horného i dolného pásu prútmi polovičných portálových stužidiel, ktoré sú v koncových bodoch uložené na kývne stojky. Jednotlivé podpery po celom obvode strechy sú spojené uzavretým prstencom tvoreným jedným prútom, ktorý zabezpečuje priestorovú stabilitu obdobne ako priehradový prstenec v skutočnej konštrukcii. V našom modeli je jeden stredný väzník na jednom konci uložený na všestranne neposuvnú kĺbovú podperu a na druhom konci na kĺbovú podperu umožňujúcu posuny len v priečnom smere, čo zabezpečuje, aby sa konštrukcia vo výpočtovom modeli nesprávala ako mechanizmus.

Všetky prúty sú navrhnuté z dutých rúrkových prierezov typu CHS z konštrukčnej ocele S355, iba ťahadlá a vzpery sú tvorené systémom Macalloy M100. Ide o ťahadlá z vysokopevnostnej ocele s medzou klzu 520 MPa a medzou únosnosti 690 MPa. Označenie M100 zodpovedá nominálnemu priemeru tyče 97 mm. Systém je dodávaný kompletný – vrátane komponentov čapových spojov, napinákov, krytiel závitov, tyčových spojok a vzpier.

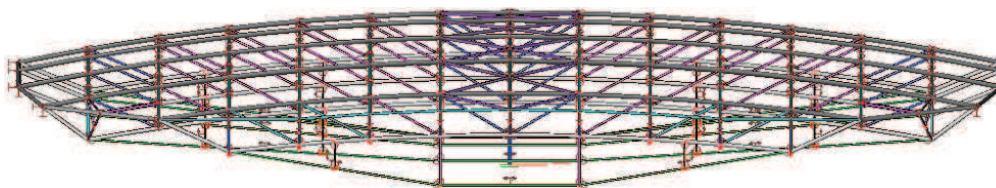
Z poznatkov z predchádzajúcej kapitoly o vplyve geometrie vzpínadla na prerozdelenie vnútorných síl boli pre jednotlivé väzníky navrhnuté rôzne výšky vzpier, podobne ako je tomu v reálnej konštrukcii. Najmenšiu výšku vzpier majú krajné väzníky – ich výška bola odhadnutá na 3,0 m. V každom ďalšom väzníku je výška vzpier zväčšená o 0,5 m, až dosiahne hodnotu 5,0 m u stredných väzníkov.



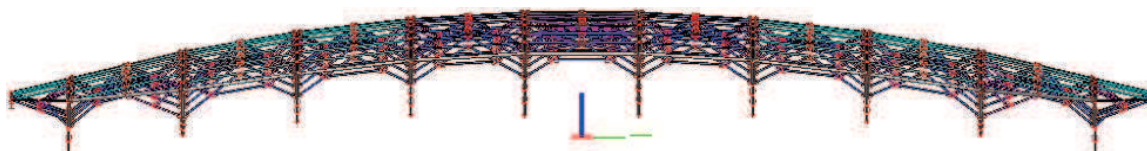
Obr. 45 Výpočtový model zastrešenia v programe SCIA Engineer 16.1



Obr. 46 Pôdorys



Obr. 47 Pohľad Y



Obr. 48 Pohľad X

5.2 Výpočet zaťaženia konštrukcie

Pozn.: V tejto podkapitole je uvedený zjednodušený výpočet zaťaženia navrhnutej konštrukcie. V niektorých prípadoch je jeho veľkosť iba odhadnutá a viac-menej ilustračná, nakoľko jeho presné stanovenie nie je stredobodom pozornosti tejto práce.

5.2.1 Stále zaťaženie

Vlastná tiaž nosnej konštrukcie:

Vygeneruje softvér na 3D modeli.

Strešný plášť

Uvažujeme strešný plášť skladaný z trapézových plechov a tepelnej izolácie. Trapézové plechy sú upevnené na privarených plechoch horných rúrok portálových stužidiel, ktoré sú usporiadané v rozstupoch 4,3 m. Odhad tiaže strešného plášťa je $g_k = 0,5 \text{ kN/m}^2$.

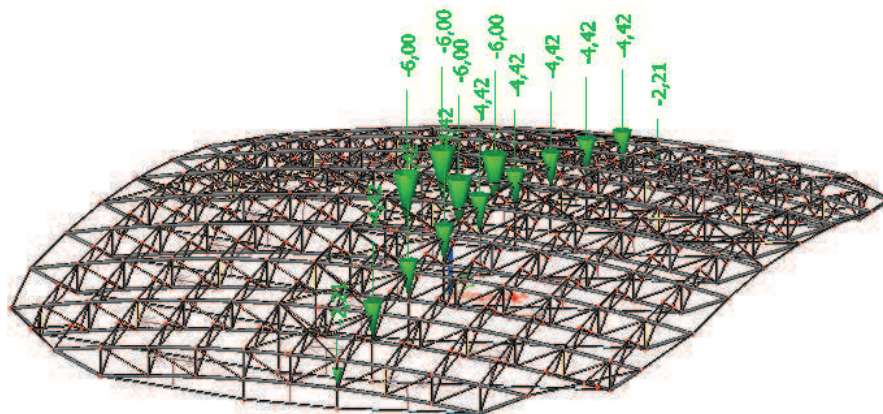
Strešný plášť sa bude na konštrukciu montovať až po plnej aktivácii predpätia.

Obslužná lávka a videokocka

V pozdĺžnom smere zastrešenia je v úrovni spodných pásov väzníkov vedená obslužná lávka pre prístup k videokocke umiestnenej nad stredom ľadovej plochy.

Uvažujeme lávku šírky 800 mm z odporovo zváraných pororostov s dvojmadlovým rúrkovým zábradlím po oboch stranách lávky. Odhad tiaže celej revíznej lávky v prepočte na bodové sily v styčníkoch spodných pásov (viď obr. 49) je $G_k = 0,8 \cdot 8,5 \cdot 0,65 = 4,42 \text{ kN}$ (platí pre medzifahlé väzníky), resp. $0,5 \cdot G_k = 2,21 \text{ kN}$ (krajné väzníky).

Zaťaženie od nosnej konštrukcie videokocky a od videokocky samotnej bolo odhadnuté na štyri osamelé sily $G_k = 6$ kN symetricky pôsobiace vo vzdialenosti 2,5 m na obe strany od stredu väzníka v úrovni spodných pásov dvoch stredných väzníkov.



Obr. 49 Zaťaženie od obslužnej lávky a videokocky

5.2.2 Úžitkové zaťaženie

Úžitkové zaťaženie na streche

Uvažujeme kategóriu strechy H, tzn. $q_k = 0,75$ kN/m², $Q_k = 1$ kN.

Pozn.: Nakoľko sa úžitkové zaťaženie na streche nekombinuje s inými premenlivými zaťažzeniami a nakoľko je hodnota tohto zaťaženia menšia ako zaťaženie snehom (viď nižšie), vo výpočte sa neuplatní.

Úžitkové zaťaženie obslužnej lávky

Maximálne úžitkové zaťaženie na obslužnej lávke je $q_k = 200$ kg/m². V prepočte na osovú silu pôsobiace v úrovni dolných pásov väzníkov dostávame $Q_k = 0,8 \cdot 8,5 \cdot 2,0 = 13,6$ kN (medziľahlé väzníky), resp. $0,5 \cdot Q_k = 0,5 \cdot 13,6 = 6,8$ kN (krajné väzníky).

5.2.3 Zaťaženie snehom

Podľa snehovej mapy ČR mesto Třinec leží v snehovej oblasti III, tzn. že charakteristická hodnota zaťaženia snehom na zemi je $s_k = 1,5$ kN/m².

Keďže norma ČSN EN 1991-1-4 neuvádza konkrétny prístup pre výpočet zaťaženia snehom pre strechy v tvare guľového vrchlíka, bol zvolený výpočet ako pre valcové strechy s dvomi možnými usporiadaniami naviatého snehu na strešnej konštrukcii – v priečnom a pozdĺžnom smere. Pri návrhu prierezov sa potom berie horší variant.

V priečnom smere uvažujeme: $\beta = 11,54^\circ$, $h = 3$ m, $b = 60$ m.

V pozdĺžnom smere uvažujeme: $\beta = 15,62^\circ$, $h = 6,1$ m, $b = 85,0$ m.

Zaťaženie snehom na zemi: $s_k = 1,5$ kN/m²

Súčiniteľ expozície: $C_e = 1,0$

Tepelný súčiniteľ: $C_t = 1,0$

*** Nenaviaty sneh:**

Tvarový súčiniteľ: $\mu_3 = 0,8$

Zaťaženie snehom: $s_{nen} = \mu_3 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,5 = 1,2$ kN/m²

*** Naviaty sneh – priečny smer:**

Tvarový súčiniteľ: $\mu_3 = 0,2 + 10 h/b = 0,2 + 10 \cdot 3/60 = 0,7$

Zaťaženie snehom: $s_{nav,pr} = \mu_3 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,7 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,5 = 1,05$ kN/m²

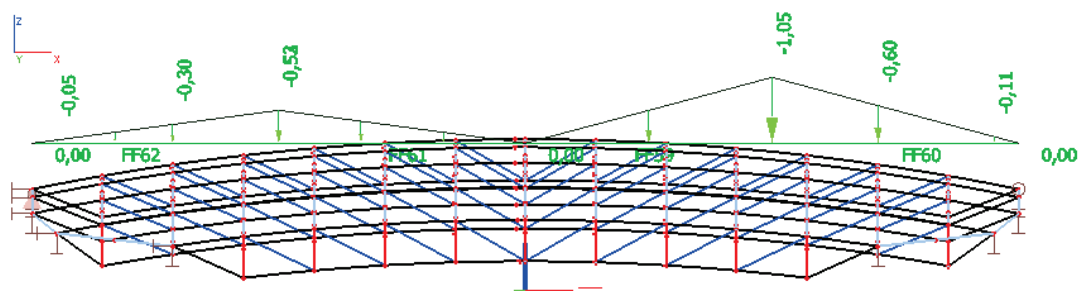
$0,5 \cdot s_{nav,pr} = 0,5 \cdot 1,05 = 0,525$ kN/m²

*** Naviaty sneh – pozdĺžny smer:**

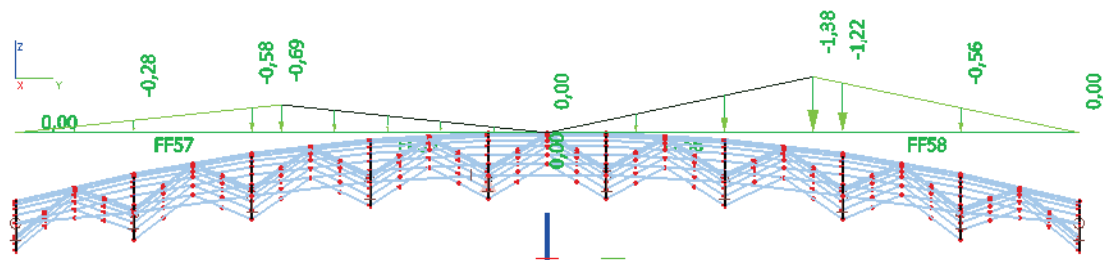
Tvarový súčiniteľ: $\mu_3 = 0,2 + 10 h/b = 0,2 + 10 \cdot 6,1/85,5 = 0,92$

Zaťaženie snehom: $s_{nav,poz} = \mu_3 \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,92 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,5 = 1,38$ kN/m²

$0,5 \cdot s_{nav,poz} = 0,5 \cdot 1,38 = 0,69$ kN/m²



Obr. 50 Zaťaženie naviatym snehom v priečnom smere



Obr. 51 Zaťaženie naviatym snehom v pozdĺžnom smere

5.2.4 Zataženie vetrom

Rýchlosť a tlak vetra

Základná rýchlosť vetra:	$v_b = 22,5 \text{ m/s}$ (veterná oblasť I)
Referenčná výška:	$z_e = z = h \doteq 25 \text{ m}$
Kategória terénu III:	parameter drsnosti terénu: $z_0 = 0,3 \text{ m}$, $z_{0,II} = 0,05 \text{ m}$ minimálna výška: $z_{min} = 5 \text{ m} \leq z_e = 25 \text{ m}$
Súčiniteľ terénu:	$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left(\frac{0,3}{0,05} \right)^{0,07} = 0,22$
Súčiniteľ drsnosti terénu:	$c_r(z) = k_r \cdot \ln \frac{z}{z_0} = 0,22 \cdot \ln \frac{25}{0,3} = 0,95$
Súčiniteľ orografie:	$c_0(z) = 1,0$
Stredná rýchlosť vetra:	$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b = 0,95 \cdot 1,0 \cdot 22,5 = 21,43 \text{ m/s}$
Súčiniteľ turbulencie:	$k_I = 1,0$
Intenzita turbulencie:	$I_v(z) = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln \frac{z}{z_0}} = \frac{1,0}{1,0 \cdot \ln \frac{25}{0,3}} = 0,23$
Max. dynamický tlak:	$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2 =$ $= [1 + 7 \cdot 0,23] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 21,43^2 = 0,74 \text{ kN/m}^2$

Tlak vetra na strešnú konštrukciu

Keďže riešená konštrukcia zastrešenia je špecifická svojím tvarom i pôdorysom, pre ktorý v norme nie je implicitne popísaný spôsob výpočtu a aplikácie zataženia vetrom, boli zvolené alternatívy zataženia ako na kopulu a valcovú klenbu, nakoľko sa tieto objekty tvarovo a pôdorysne najviac podobajú riešenej konštrukcii. V každej z alternatív boli samostatne riešené dve možnosti – zvlášť pre priečny a zvlášť pre pozdĺžny rozmer zastrešenia. Celkovo teda uvažujeme štyri kombinácie zataženia vetrom.

Pozn.: Zataženie je modelované ako *voľné na plochu* s parametrom *LSS prvku*, čo znamená, že vo výsledku je aplikované ako bodové zataženie kolmo na dotyčnicovú rovinu priestorového objektu v danom uzle.

Zataženie vetrom na kopule

Súčinitele vonkajšieho tlaku vetra c_{pe} boli získané interpoláciou v grafe pre zataženie pre kopule s kruhovou základňou (obr. 7.12 normy [4]). Predpokladáme umiestnenie otváraateľných otvorov v obvodovom plášti haly, preto musíme uvažovať aj vnútorný tlak, a teda súčiniteľ c_{pi} .

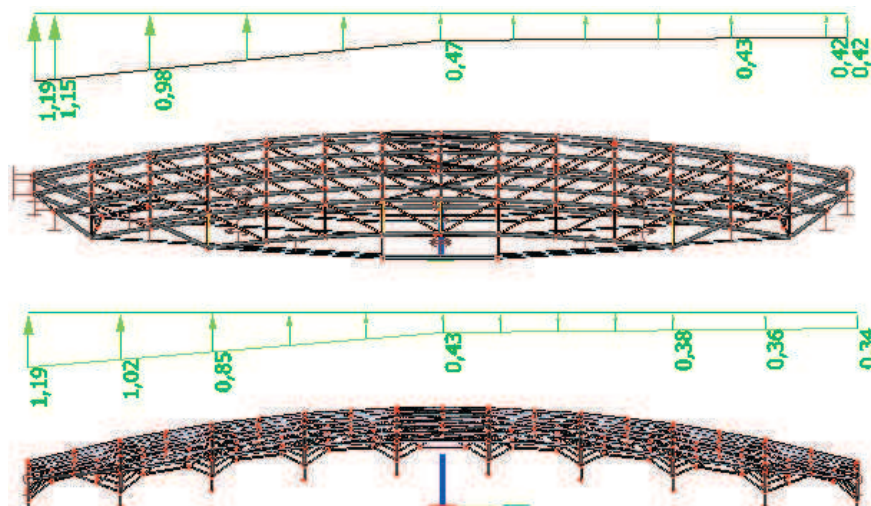
V tabuľke nižšie sú uvedené vstupné výpočtové parametre a výsledné plošné zataženie od vetra pre priečny a pozdĺžny smer.

Výsledný tlak vetra na strešnú konštrukciu: $w_k = w_e + w_i = q_p(z) \cdot (c_{pe} - c_{pi})$.

Tab. 5 Výpočet zaťaženia od vetra na kopule

PRIEČNY SMER			oblasť	maximálny tlak q_z [kN/m ²]	súčinitele tlaku		zaťaženie vetrom w_k [kN/m ²]
vzopätie	f =	m			vonkajšieho c_{pe}	vnútorného c_{pi}	
výška	h =	m					
priemer	d =	m	A	0,74	-1,40	0,2	-1,19
pomery	f/d =	-	B		-0,44	0,2	-0,47
	h/d =	-	C		-0,37	0,2	-0,42

POZDĹŽNY SMER			oblasť	maximálny tlak q_z [kN/m ²]	súčinitele tlaku		zaťaženie vetrom w_k [kN/m ²]
vzopätie	f =	m			vonkajšieho c_{pe}	vnútorného c_{pi}	
výška	h =	m					
priemer	d =	m	A	0,74	-1,40	0,2	-1,19
pomery	f/d =	-	B		-0,38	0,2	-0,43
	h/d =	-	C		-0,26	0,2	-0,34



Obr. 52 Zaťaženie vetrom na kopule v priečnom a pozdĺžnom smere (schematické zadanie)

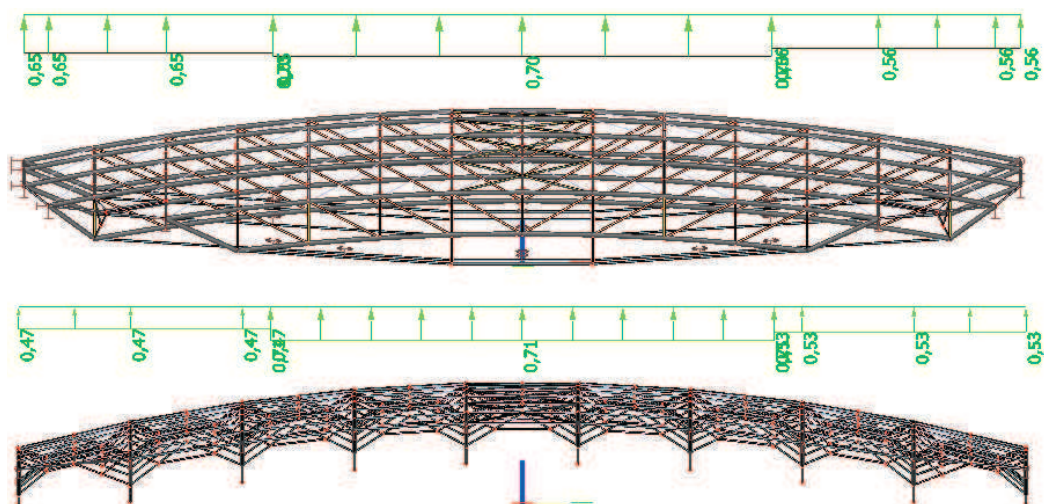
Zaťaženie vetrom na klenbe

Aj v tomto prípade boli súčinitele vonkajšieho tlaku vetra c_{pe} získané interpoláciou v grafe pre zaťaženie pre klenbové strechy s pravouhlým pôdorysom (obr. 7.11 normy [4]).

Tab. 6 Výpočet zaťaženia od vetra na klenbovej streche

PRIEČNY SMER				oblasť	maximálny tlak q_z [kN/m ²]	súčinitele tlaku		zaťaženie vetrom w_k [kN/m ²]
vzopätie	f =	3	m			vonkajšieho c_{pe}	vnútorného c_{pi}	
výška	h =	22	m					
priemer	d =	60	m	A	0,74	-0,67	0,2	-0,65
pomery	f/d =	0,05	-	B		-0,75	0,2	-0,70
	h/d =	0,37	-	C		-0,55	0,2	-0,56

POZDĹŽNY SMER				oblasť	maximálny tlak q_z [kN/m ²]	súčinitele tlaku		zaťaženie vetrom w_k [kN/m ²]
vzopätie	f =	4,9	m			vonkajšieho c_{pe}	vnútorného c_{pi}	
výška	h =	20,1	m					
priemer	d =	76,5	m	A	0,74	-0,43	0,2	-0,47
pomery	f/d =	0,06	-	B		-0,76	0,2	-0,71
	h/d =	0,26	-	C		-0,52	0,2	-0,53



Obr. 53 Zaťaženie vetrom na klenbe v priečnom a pozdĺžnom smere (schematické zadanie)

5.2.5 Zaťaženie teplotou

Zaťaženie konštrukcie teplotou budeme uvažovať iba v prevádzkovom stave. Nosná konštrukcia zastrešenia je chránená pred priamymi poveternostnými vplyvmi skladaným strešným plášťom s tepelnou izoláciou. Uvažujeme také rozmedzie vnútorných teplôt, ktoré umožní prevádzkovanie ľadovej plochy, ale aj usporiadanie kultúrneho podujatia (napr. koncertu). Preto ako východiskové teploty budeme uvažovať vnútorné teploty T_{in} rovné:

$$T_{in,min} = 10^{\circ}$$

$$T_{in,max} = 30^{\circ}$$

Uvažujeme, že konštrukcia bola postavená pri teplotnom rozsahu 10° až 30° (reálna konštrukcia bola zmontovaná v letných mesiacoch), tzn.:

$$* T_{0,min} = 10^{\circ}$$

$$* T_{0,max} = 30^{\circ}$$

Zaťaženie oteplením, resp. ochladením, bude nasledovné:

$$\Delta T_u^+ = T_{in,max} - T_{0,min} = 30^{\circ} - 10^{\circ} = 20^{\circ}$$

$$\Delta T_u^- = T_{in,min} - T_{0,max} = 10^{\circ} - 30^{\circ} = -20^{\circ}$$

5.2.6 Predpätie

Z poznatkov získaných z parametrickej štúdie vplyvu predpätia na 2D a 3D modeli bolo rozhodnuté, že do krajných väzníkov bude vnášané predpätie veľkosti 1 200 kN, do druhých väzníkov 1 400 kN a do všetkých ostatných 1 600 kN.

5.3 Kombinácie zaťaženia

Druhy zaťaženia, ktorých výpočet bol uvedený vyššie, môžeme zosumarizovať do nasledujúcej tabuľky:

Tab. 7 Prehľad uvažovaných zaťažení

Zač. st.	Zaťaženie	Typ	Špecifikácia
LC1	Vlastná tiaž	stále	vlastná tiaž
LC2	Ostatné stále	stále	štandard
LC3	Úžitkové – obslužná lávka	premenné	úžitkové – lávka
LC4	Sneh naviaty	premenné	sneh – výberový
LC5	Sneh naviaty – pozdĺžne	premenné	sneh – výberový
LC6	Sneh naviaty – priečne	premenné	sneh – výberový
LC7	Vietor kopula – priečny	premenné	vietor – výberový
LC8	Vietor kopula – pozdĺžny	premenné	vietor – výberový
LC9	Vietor klenba – priečny	premenné	vietor – výberový
LC10	Vietor klenba – pozdĺžny	premenné	vietor – výberový
LC11	Ochladenie	premenné	teplota – výberový
LC12	Oteplenie	premenné	teplota – výberový
LC13	Predpätie	stále	predpätie

Kombinácie zaťaženia boli vytvorené programom SCIA Engineer 16.1 v súlade s normou ČSN EN 1990 a štandardným európskym dodatkom. Po výpočte všetkých nelineár-

nych kombinácií nepredpätej konštrukcie boli vybrané rozhodujúce kombinácie pre medzný stav únosnosti, t.j. kombinácie, v ktorých boli dosiahnuté maximálne vnútorné sily na jednotlivých typoch prvkov. Na základe týchto výsledkov boli potom navrhnuté prierezy prútov.

Návrhové vnútorné sily a navrhnuté prierezy sú uvedené v tabuľke posúdenia normálového namáhania prútov (tab. 8).

Rozhodujúce kombinácie zaťaženia

$$\begin{aligned}
 \text{NC1:} & \quad 1,35 \cdot \text{LC1} + 1,0 \cdot \text{LC13} \\
 \text{NC28:} & \quad 1,35 \cdot (\text{LC1} + \text{LC2}) + 1,5 \cdot \text{LC4} + 0,05 \cdot \text{LC3} + 1,0 \cdot \text{LC13} + 0,9 \cdot \text{LC12} \\
 \text{NC30:} & \quad 1,35 \cdot (\text{LC1} + \text{LC2}) + 1,5 \cdot \text{LC4} + 1,05 \cdot \text{LC3} + 1,0 \cdot \text{LC13} + 0,9 \cdot \text{LC11} \\
 \text{NC70:} & \quad 1,0 \cdot (\text{LC1} + \text{LC2} + \text{LC13}) + 1,5 \cdot \text{LC6} + 0,9 \cdot (\text{LC7} + \text{LC12}) + 1,05 \cdot \text{LC3} \\
 \text{NC214:} & \quad 1,0 \cdot (\text{LC1} + \text{LC2} + \text{LC13}) + 1,5 \cdot \text{LC7} + 0,9 \cdot \text{LC12} \\
 \text{NC215:} & \quad 1,0 \cdot (\text{LC1} + \text{LC2} + \text{LC13}) + 1,5 \cdot \text{LC7} + 0,9 \cdot \text{LC11}
 \end{aligned}$$

5.4 Posúdenie únosnosti prvkov

5.4.1 Posúdenie prútov v ťahu a vzpernom tlaku

Pre výpočet únosnosti navrhnutých prútov vo vzpernom tlaku boli použité nasledovné vzorce:

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \frac{L_{cr}}{i} & \phi &= 0,5 \cdot \left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \\
 \lambda_1 &= 93,9 \sqrt{\frac{235}{f_y}} & \chi &= \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \\
 \bar{\lambda} &= \frac{\lambda}{\lambda_1} & N_{b,Rd} &= \chi \cdot A \cdot f_{yd}
 \end{aligned}$$

Pozn.: Všetky prúty zastrešenia (okrem ťahadiel) sú rúrkové, preto pre získanie ich minimálnej únosnosti vo vzpernom tlaku budeme uvažovať najväčšiu možnú vzpernú dĺžku.

Vzpernú dĺžku každého prúta L_{cr} získame pre násobením teoretickej dĺžky prúta L_{teor} medzi bodmi zaistenými proti vybočeniu v rovine/z roviny väzby príslušným súčiniteľom a :

$$\begin{aligned}
 a = 0,75 & \quad \text{pre výplňové prúty privarené k pásom po celom obvode prierezu,} \\
 a = 1,0 & \quad \text{pre prúty so skrutkovými prípojkami,} \\
 a = 0,9 & \quad \text{pre pásové prúty.}
 \end{aligned}$$

Pre únosnosť prierezu v ťahu platí: $N_{t,Rd} = A \cdot f_{yd}$ [kN]

Tab. 8 Návrh a posúdenie únosnosti priereзов vo vzpernom tlaku a v ťahu

POSÚDENIE ÚNOSNOSTI VO VZPERNOM TLAKU																	POSÚDENIE ÚNOSNOSTI V ŤAHU					
prút		návrh. sila	medza kizu	návrh prierezu		teor. dĺžka	opravný súčiniteľ	vzperná dĺžka	moment zotrvač.	polom. zotr.	štrhlosť	pomerná štrhlosť	súčinit. imperf.	súčinit. vzper.	vzperná únosnosť	využitie prierezu	Posúdenie	návrh.			Posúdenie	
				priemer	hrúbka													plocha	sila	únosn. v ťahu		využitie
		N_{ed} [kN]	f_y [MPa]	d [mm]	t [mm]	A [mm ²]	L_{w}/L	L_{cr} [mm]	I [mm ⁴]	i [mm]	λ	λ_{-}	α	ϕ	χ	$N_{b,Red}$ [kN]	$N_{ed}/N_{b,Red}$	N_{ed} [kN]	$N_{ed}/N_{t,Red}$	Posúdenie		
horný pás		1520,1	355	215,1	10,0	6569	4300	3870	35984390	74	52,3	0,68	0,21	0,79	0,85	1993,7	0,76	VYHOVUJE	326,0	2332,0	0,14	VYHOVUJE
dolný pás		784,3	355	177,8	8,0	4268	4300	3870	15414374	60	64,4	0,84	0,21	0,92	0,77	1167,0	0,67	VYHOVUJE	0,0	1515,0	0,00	VYHOVUJE
diagonály		162,4	355	177,8	8,0	4268	4576	3432	15414374	60	57,1	0,75	0,21	0,84	0,82	1248,8	0,13	VYHOVUJE	1334,9	1515,0	0,88	VYHOVUJE
1		119,3	355	88,9	4,0	1067	4667	3500	963398	30	116,5	1,52	0,21	1,80	0,36	137,2	0,87	VYHOVUJE	258,4	378,7	0,68	VYHOVUJE
2		70,1	355	82,5	4,0	986	4718	3539	761825	28	127,3	1,67	0,21	2,04	0,31	108,6	0,65	VYHOVUJE	189,5	350,2	0,54	VYHOVUJE
3		46,4	355	70,0	4,0	829	4771	3578	453256	23	153,1	2,00	0,21	2,70	0,22	65,4	0,71	VYHOVUJE	89,6	294,4	0,30	VYHOVUJE
4		117,7	355	101,6	4,0	1226	4827	3620	1462845	35	104,8	1,37	0,21	1,56	0,43	188,0	0,63	VYHOVUJE	17,5	435,4	0,04	VYHOVUJE
5		220,1	355	114,3	4,5	1552	4884	3663	2343194	39	94,3	1,23	0,21	1,37	0,51	280,4	0,78	VYHOVUJE	39,9	551,1	0,07	VYHOVUJE
6		97,6	355	88,9	4,0	1067	4901	3676	963398	30	122,3	1,60	0,21	1,93	0,33	126,1	0,77	VYHOVUJE	105,4	378,7	0,28	VYHOVUJE
7		176,3	355	82,5	4,0	986	2500	1875	761825	28	67,5	0,88	0,21	0,96	0,74	260,9	0,68	VYHOVUJE	88,3	350,2	0,25	VYHOVUJE
závislice		150,0	355	70,0	4,0	829	2500	1875	453256	23	80,2	1,05	0,21	1,14	0,63	185,7	0,81	VYHOVUJE	42,5	294,4	0,14	VYHOVUJE
1		130,5	355	70,0	4,0	829	2500	1875	453256	23	80,2	1,05	0,21	1,14	0,63	185,7	0,70	VYHOVUJE	60,8	294,4	0,21	VYHOVUJE
2		92,9	355	57,0	4,0	666	2500	1875	235187	19	99,8	1,31	0,21	1,47	0,47	110,4	0,84	VYHOVUJE	31,2	236,4	0,13	VYHOVUJE
3		69,6	355	57,0	4,0	666	2500	1875	235187	19	99,8	1,31	0,21	1,47	0,47	110,4	0,63	VYHOVUJE	61,0	236,4	0,26	VYHOVUJE
4		158,9	355	70,0	4,0	829	2500	1875	453256	23	80,2	1,05	0,21	1,14	0,63	185,7	0,86	VYHOVUJE	51,6	294,4	0,18	VYHOVUJE
5		137,1	355	70,0	4,0	829	2500	1875	453256	23	80,2	1,05	0,21	1,14	0,63	185,7	0,74	VYHOVUJE	33,5	294,4	0,11	VYHOVUJE
6		78,4	355	101,6	4,0	1226	4257	4257	1462845	35	123,3	1,61	0,21	1,95	0,33	143,0	0,55	VYHOVUJE	232,3	435,4	0,53	VYHOVUJE
v strede	vážnice	103,0	355	101,6	4,0	1226	4365	4365	1462845	35	126,4	1,65	0,21	2,02	0,31	136,8	0,75	VYHOVUJE	101,8	435,4	0,23	VYHOVUJE
na krajoch	port. stuž.	21,3	355	82,5	4,0	986	5059	1,00	5059	761825	28	182,0	2,38	3,57	0,16	56,3	0,38	VYHOVUJE	22,4	350,2	0,06	VYHOVUJE
v strede	veľká	76,3	355	101,6	4,0	1226	5503	1,00	5503	1462845	35	159,3	2,09	2,87	0,21	89,8	0,85	VYHOVUJE	113,7	435,4	0,26	VYHOVUJE
na krajoch	portálové	28,1	355	57,0	4,0	666	4257	0,75	3193	235187	19	169,9	2,22	3,19	0,18	43,3	0,65	VYHOVUJE	34,2	236,4	0,14	VYHOVUJE
stred vodor.	stred šikmé	15,8	355	42,4	4,0	483	2530	1,00	2530	89908	14	185,3	2,43	3,68	0,16	26,6	0,59	VYHOVUJE	20,8	171,3	0,12	VYHOVUJE
stred šikmé	stužidlo malé	60,6	355	70,0	4,0	829	4365	0,75	3274	453256	23	140,0	1,83	2,35	0,26	77,0	0,79	VYHOVUJE	156,0	294,4	0,53	VYHOVUJE
krajné vodor.	krajné šikmé	36,9	355	57,0	4,0	666	2753	1,00	2753	235187	19	146,5	1,92	2,52	0,24	56,9	0,65	VYHOVUJE	96,3	236,4	0,41	VYHOVUJE
obvodové	pozdišné	156,7	355	135,7	8,0	3310	8500	1,00	8500	7202889	47	182,2	2,39	3,57	0,16	188,5	0,83	VYHOVUJE	259,7	1175,0	0,22	VYHOVUJE
obvodové	priečne	57,9	355	101,6	4,0	1226	4797	1,00	4797	1462845	35	138,9	1,82	2,32	0,27	115,6	0,50	VYHOVUJE	73,1	435,4	0,17	VYHOVUJE
stredné	strešné	267,3	355	135,7	8,0	3310	6102	1,00	6102	7202889	47	130,8	1,71	2,21	0,30	347,4	0,77	VYHOVUJE	88,8	1175,0	0,08	VYHOVUJE
stredné	stužidlo	232,9	355	127,0	5,6	2136	5000	1,00	5000	3943003	43	116,4	1,52	1,80	0,36	275,1	0,85	VYHOVUJE	0,0	758,2	0,00	VYHOVUJE
vzpery	ťahadlá	0	520	97,0	97,0	7390	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	VYHOVUJE	1828,2	3235,0	0,37	VYHOVUJE

5.4.2 Posúdenie únosnosti horného pása na kombináciu tlaku a ohybu

Kruhový prierez nie je náchylný na stratu priečnej a torznej stability, preto uvažujeme $\chi_{LT} = 1,0$. Pre výpočet súčiniteľa vzpernosti χ_y viď tabuľku posúdenia vzpernej únosnosti.

Zatriedenie prierezu

$$\frac{d}{t} = \frac{219,1}{10} = 21,91 \leq 50\varepsilon^2 = 50\sqrt{235/355}^2 = 33,10 \Rightarrow \text{prierez triedy 1}$$

Návrhové hodnoty (NC30)

$$N_{Ed} = -1520,1 \text{ kN}$$

$$M_{Ed,y} = 18,5 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed,z} = 2,5 \text{ kNm}$$

$$A = 6569 \text{ mm}^2$$

$$W_{pl,y} = 430,7 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

$$\chi_y = \chi_z = 0,85$$

$$\bar{\lambda} = 0,68$$

$$N_{Rk} = A \cdot f_y = 6569 \cdot 355 = 2332,0 \text{ kN}$$

$$M_{y,Rk} = M_{z,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 430,7 \cdot 10^3 \cdot 355 = 152,9 \text{ kNm}$$

Súčiniteľ k_{yy}

$$\alpha_s = -4/18,5 = -0,22$$

$$\psi = 17,2/18,5 = 0,93$$

$$C_{my} = -0,8 \cdot \alpha_s = -0,8 \cdot (-0,22) = 0,17 \leq 0,4 \Rightarrow 0,4$$

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}/\gamma_{M_1}} \right) = 0,4 \left(1 + (0,68 - 0,2) \frac{1520100}{0,85 \cdot 2,33 \cdot 10^3/1,0} \right) =$$
$$= 0,55 \leq C_{my} \left(1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}/\gamma_{M_1}} \right) = 0,65 \Rightarrow k_{yy} = 0,55$$

Súčiniteľ k_{yz}

$$\psi = -1,7/2,5 = -0,68$$

$$C_{mz} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi = 0,6 + 0,4 \cdot (-0,68) = 0,33 \leq 0,4 \Rightarrow 0,4$$

$$k_{yz} = 0,6k_{zz} = 0,6k_{yy} = 0,6 \cdot 0,55 = 0,33$$

Súčiniteľ k_{zy}

$$k_{zy} = 0,6k_{yy} = 0,6 \cdot 0,55 = 0,33$$

Súčiniteľ k_{zz}

$$k_{zz} = k_{yy} = 0,55$$

Posúdenie:

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M_1}} + k_{yy} \cdot \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}}{\gamma_{M_1}} + k_{yz} \cdot \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}}}{\gamma_{M_1}} \leq 1$$

$$\frac{\frac{1520,1}{0,85 \cdot 2332,0}}{1,0} + 0,55 \cdot \frac{\frac{18,5}{1,0 \cdot 152,9}}{1,0} + 0,33 \cdot \frac{\frac{2,5}{152,9}}{1,0} = 0,84 \leq 1$$

\Rightarrow **VYHOVUJE**

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}}}{\gamma_{M_1}} + k_{zy} \cdot \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}}}{\gamma_{M_1}} + k_{zz} \cdot \frac{\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}}}{\gamma_{M_1}} \leq 1$$

$$\frac{\frac{1520,1}{0,85 \cdot 2332,0}}{1,0} + 0,33 \cdot \frac{\frac{18,5}{1,0 \cdot 152,9}}{1,0} + 0,55 \cdot \frac{\frac{2,5}{152,9}}{1,0} = 0,82 \leq 1$$

\Rightarrow **VYHOVUJE**

5.4.3 Posúdenie únosnosti ťahadiel

Na posúdenie únosnosti ťahadiel Macalloy M100 využijeme tabuľkovú únosnosť prepočítanú podľa českých technických noriem [32]:

$$N_{t,Ed} = 1828,2 \text{ kN} \leq N_{u,Rd} = 3235,0 \text{ kN}$$

\Rightarrow **VYHOVUJE**

5.5 Návrh a posúdenie vybraných spojov a styčníc

Všetky styčníky mezi průtmi vězníků a portálových stěžníků jsou prostorové a preto ich únosnosť musíme redukovat príslušným súčiniteľom podľa kapitoly 7.4.3 normy [20].

V konstrukcii je navrhnutých niekoľko typov styčníc. V tejto časti sa zameriame na styčníky dolného a horného pásu s medzipásovými průtmi a prvkami portálového stěžníka (mimo styčníc, kde sa napájajú vzpery vzpínadiel a průty strešného stěžníka).

Každý spomínaný styčník dolného i horného pásu vězníka je priestorový a má dve hlavné roviny. Jednou je rovina samotného vězníka, druhá rovina je na ňu kolmá a prechádza zvislou osou zvislice. Medzipásové průty v rovine vězníka sú k pásom privarené po celom obvode a klasifikujeme ich ako "N" styčníky, resp. "KT" styčníky v osi symetrie vězníka. Posúdenie ich únosnosti bude preto spočívať v stanovení únosnosti pre porušenie povrchu pásu a pre porušenie prelomením šmykom.

V druhej rovine sa v danom styčníku dolného pásu z oboch strán montážne pripájajú veľké průty portálového stěžníka. Tento spoj je navrhnutý ako skrutkovaný k styčnicovému plechu, ktorý je zarezaný zhruba do polovice výšky pásu a tupým zvarom je k nemu privarený. Toto konstrukčné riešenie nás zbavuje povinnosti posudzovať únosnosť styčníc pri

porušení povrchu pásu "prepichnutím" styčnickovým plechom. Prúty portálového stužidla majú na pripájanom konci taktiež zarezaný styčnickový plech, ktorý je s rúrkou zvarený kútovým zvarom pozdĺž celého zárezu. Montážny spoj je navrhnutý ako jednostrizný, dvoj-skrutkový.

V prípade horného pásu je hlavný styčnickový plech celistvý a jednotlivé časti pásu sú k nemu z oboch strán privarené tupým spojom okolo celého obvodu rúrky. K styčnickovému plechu sa pripájajú malé vzpery portálového stužidla a väznice – tie majú spoločný styčnickový plech, ktorý je do oboch prútov zarezaný a privarený pozdĺž celého zárezu. Spoj je navrhnutý ako jednostrizný skrutkový pomocou štyroch skrutiek.

Únosnosť priestorových styčnickov by sa mala redukovať príslušným súčiniteľom. Geometria našich styčnickov je špecifická a vymyká sa prípadom uvedeným v norme. Zjednodušene preto uvažujeme, že prítomnosť zarezaného a privareného styčnickového plechu zaistí styčniku väčšiu únosnosť ako by to bolo v prípade, kedy by bol plech privarený iba k povrchu pásu. Konzervatívne však budeme uvažovať redukčný súčiniteľ $\mu = 0,9$ pre únosnosť zváraného styčníka v rovine väzníka.

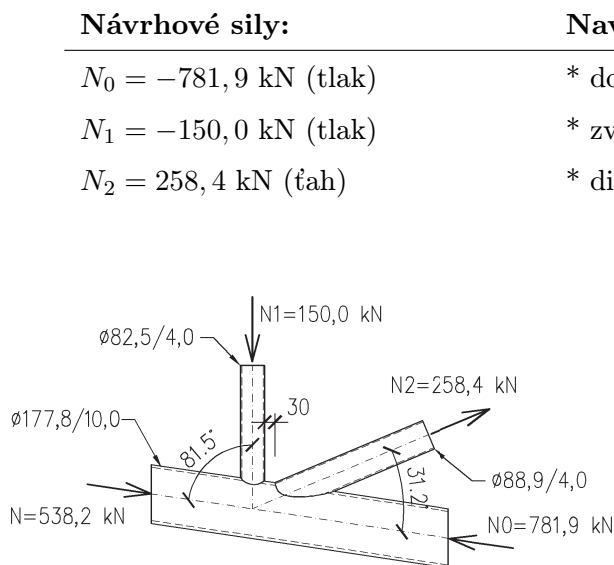
Všetky styčnickové plechy sú navrhnuté z ocele S355 J2+N, aby ich privarením do konštrukcie bola zaistená rovnaká únosnosť ako únosnosť pripájaných prvkov.

V nasledujúcej časti sú uvedené reprezentatívne príklady posúdenia vybraných styčnickov a spojov.

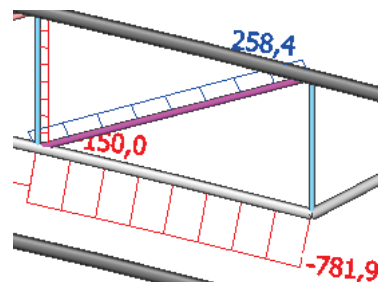
5.5.1 Posúdenie styčníka dolného pásu

(a) Zváraný N styčník v rovine väzníka

Predpokladá sa privarenie výplňových prútov k dolnému pásu po celom obvode tupým zvarom.



Obr. 54 Geometria styčníka



Obr. 55 Návrhové sily v styčniku

Overenie geometrie styčníka

$$\begin{aligned}
t_1 + t_2 &= 4 + 4 = 8 \leq g = 30 \text{ mm} & 10 \leq d_0/t_0 &= 177,8/10 = 17,8 \leq 50 \\
0,2 \leq d_1/d_0 &= 82,5/177,8 = 0,46 \leq 1,0 & 10 \leq d_1/t_1 &= 82,5/4 = 20,6 \leq 50 \\
0,2 \leq d_2/d_0 &= 88,9/177,8 = 0,50 \leq 1,0 & 10 \leq d_2/t_2 &= 88,9/4 = 22,23 \leq 50
\end{aligned}$$

⇒ **VYHOVUJE**

Porušenie povrchu pásu – styčník N s medzerou

$$N_{p,Ed} = N_{0,Ed} - \sum N_{i,Ed} \cos \theta_i = 781,9 - (150,0 \cos 81,5^\circ - 258,4 \cos 31,2^\circ) = 980,7 \text{ kN}$$

$$\sigma_{p,Ed} = \frac{N_{p,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,0}} = \frac{980,7 \cdot 10^3}{5272} + \frac{8,4 \cdot 10^6}{2,09 \cdot 10^5} = 226,2 \text{ MPa}$$

$$n_p = \frac{\sigma_{p,Ed}}{f_{y0}\gamma_{M5}} = \frac{226,2}{355 \cdot 1,0} = 0,64 > 0$$

$$k_p = 1 - 0,3n_p(1 + n_p) = 1 - 0,3 \cdot 0,64(1 + 0,64) = 0,68 \leq 1,0$$

$$\gamma = \frac{d_0}{2t_0} = \frac{177,8}{2 \cdot 10} = 8,9$$

$$k_g = \gamma^{0,2} \left(1 + \frac{0,024 \cdot \gamma^{1,2}}{1 + \exp\left(\frac{0,5g}{t_0} - 1,33\right)} \right) = 8,9^{0,2} \left(1 + \frac{0,024 \cdot 8,9^{1,2}}{1 + \exp\left(\frac{0,5 \cdot 30}{10} - 1,33\right)} \right) = 1,78$$

Posúdenie:

$$N_{1,Rd} = \mu \frac{k_g k_p f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} \left(1,8 + 10,2 \frac{d_1}{d_0} \right) / \gamma_{M5} = 0,9 \frac{1,78 \cdot 0,68 \cdot 355 \cdot 10^2}{\sin 81,5^\circ} \left(1,8 + 10,2 \frac{82,5}{177,8} \right) / 1,0$$

$$N_{1,Rd} = 255,7 \text{ kN} \geq N_{1,Ed} = 150,0 \text{ kN}$$

$$N_{2,Rd} = \mu \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} N_{1,Rd} = 0,9 \frac{\sin 81,5^\circ}{\sin 31,2^\circ} 255,7 = 488,3 \text{ kN} \geq N_{2,Ed} = 258,4 \text{ kN}$$

⇒ **VYHOVUJE**

Porušenie prelomením šmykom – styčník N s medzerou

$$d_1 = 82,5 \leq d_0 - 2t_0 = 177,8 - 2 \cdot 10 = 157,8$$

$$d_2 = 88,9 \leq d_0 - 2t_0 = 177,8 - 2 \cdot 10 = 157,8$$

⇒ **VYHOVUJE**

Posúdenie:

$$N_{1,Rd} = \mu \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_1 \frac{1 + \sin \theta_1}{2 \sin^2 \theta_1} / \gamma_{M5} = 0,9 \frac{355}{\sqrt{3}} \cdot 10 \cdot \pi \cdot 82,5 \frac{1 + \sin 81,5^\circ}{2 \sin^2 81,5^\circ} / 1,0 = 486,1 \text{ kN}$$

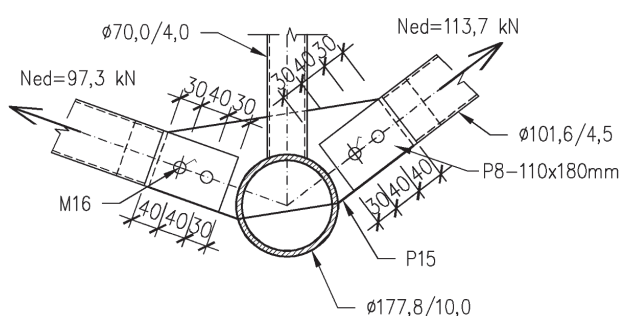
$$N_{1,Rd} = 486,1 \text{ kN} \geq N_{1,Ed} = 150,0 \text{ kN}$$

$$N_{2,Rd} = \mu \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_2 \frac{1 + \sin \theta_2}{2 \sin^2 \theta_2} / \gamma_{M5} = 0,9 \frac{355}{\sqrt{3}} \cdot 10 \cdot \pi \cdot 88,9 \frac{1 + \sin 31,2^\circ}{2 \sin^2 31,2^\circ} / 1,0 = 1\,457,2 \text{ kN}$$

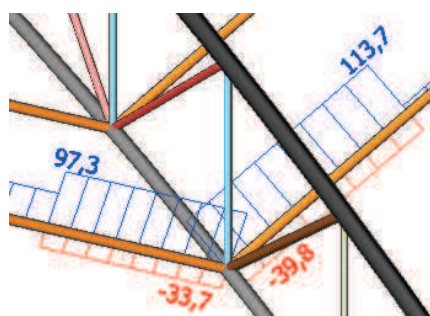
⇒ **VYHOVUJE**

(b) Skrutkový prípoj pomocou styčnickových dosiek

Pripojenie portálových vzpier bude realizované pomocou montážneho skrutkového spoja. Hrúbka plechu zarezaného do styčníka je 15 mm, plech na konci vzpier má 8 mm. V oboch styčnickových plechoch budú pripravené dva otvory priemeru 18 mm pre skrutky M16 pevnostnej triedy 8.8.



Obr. 56 Geometria styčníka



Obr. 57 Maximálne sily v styčníku

Návrhové sily:

$$N_{t.Ed} = 113,7 \text{ kN (tah)}$$

$$N_{c,Ed} = -39,8 \text{ kN (tlak)}$$

Skrutky M20–8.8:

$$f_{ub} = 800 \text{ MPa}$$

$$A_s = 157 \text{ mm}^2$$

$$d = 16 \text{ mm}, d_0 = 18\text{mm}$$

Únosnost styčnickového plechu (na rúrke)

Návrh: P8-110×180 mm

$$A = 8 \cdot 110 = 880 \text{ mm}^2$$

$$N_{t,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M_0}} = \frac{880 \cdot 355}{1,0} = 312,4 \text{ kN} \geq N_{t,Ed} = 113,7 \text{ kN}$$

⇒ **VYHOVUJE**

$$A_{net} = 880 - 8 \cdot 18 = 736 \text{ mm}^2$$

$$N_{u,Rd} = 0,9 \cdot \frac{A_{net} f_u}{\gamma_{M_2}} = 0,9 \cdot \frac{528 \cdot 510}{1,25} = 270,3 \text{ kN} \geq N_{t,Ed} = 113,7 \text{ kN}$$

⇒ **VYHOVUJE**

Plech prerezaný a prevarený skrze styčník bezpečne vyhoví.

Únosnosť skrutkového spoja v šmyku (2×M16–8.8)

Únosnosť v strihu:

$$F_{v,Rd} = 2 \frac{\alpha_v \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = 2 \frac{0,6 \cdot 157 \cdot 800}{\gamma_{M2}} = 120,6 \text{ kN} \geq N_{t,Ed} = 113,7 \text{ kN}$$

⇒ **VYHOVUJE**

Únosnosť v otláčení:

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,5 \\ 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{51}{18} - 1,7 = 6,23 \end{array} \right\} = 2,5$$

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,0 \\ \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{510} = 1,59 \\ \frac{e_1}{3d_0} = \frac{30}{54} = 0,55 \\ \frac{p_1}{3d_0} - 0,25 = \frac{40}{54} - 0,25 = 0,49 \end{array} \right\} = 0,49$$

$$t = \min\{8; 15\} = 8 \text{ mm}$$

$$F_{b,Rd} = 2 \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot d \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = 2 \frac{2,5 \cdot 0,49 \cdot 16 \cdot 8 \cdot 510}{1,25} = 127,9 \text{ kN} \geq N_{t,Ed} = 113,7 \text{ kN}$$

⇒ **VYHOVUJE**

Vytrhnutie skupiny skrutiek z plechu privareného k rúrke

$$A_{nt} = (51 - 9) \cdot 8 = 336 \text{ mm}^2$$

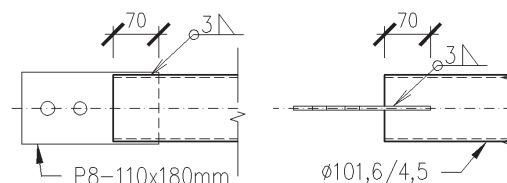
$$A_{nv} = (30 + 40 - 18 - 9) \cdot 8 = 344 \text{ mm}^2$$

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{A_{nt} f_u}{\gamma_{M2}} + \frac{A_{nv} f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{336 \cdot 510}{1,25} + \frac{344 \cdot 355}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 207,6 \text{ kN} \geq N_{t,Ed} = 113,7 \text{ kN}$$

⇒ **VYHOVUJE**

Plech prevarený skrze styčník bezpečne vyhoví.

Únosnosť zvarov medzi styčníkovým plechom a rúrkou



Obr. 58 Zvarový spoj styčníkového plechu zarezaného do rúrky portálového stúžidla

Styčnickový plech bude s rúrkou zvarový kútový zvarom s účinnou hrúbkou zvaru $a = 3 \text{ mm}$ po celom obvode zárezu. Plech hrúbky 8 mm bude v rúrke zarezaný do hĺbky 70 mm .

$$a = 3 \text{ mm}$$

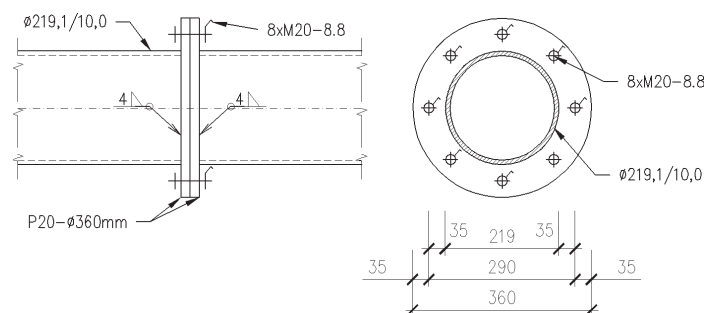
$$L = 2 \cdot (2 \cdot 70 + 8) = 292 \text{ mm}$$

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3}\beta_w\gamma_{M2}} = \frac{510}{\sqrt{3} \cdot 0,9 \cdot 1,25} = 261,7 \text{ MPa}$$

$$F_{w,Rd} = L a f_{vw,d} = 292 \cdot 3 \cdot 261,7 \cdot 10^{-3} = 229,2 \text{ kN} \geq F_{Ed} = 113,7 \text{ kN}$$

⇒ **VYHOVUJE**

5.5.2 Posúdenie montážneho styku horného pásu – prípoj čelnou doskou



Obr. 59 Geometria montážneho spoja horného pásu

Únosnosť skrutiek v ťahu a vplyv páčenia

Tlaková sila sa preniesie priamym dotykom opracovaných plôch. S ohľadom na vzper bude styk umiestnený v krajných štvrtinách dĺžky prúta.

Návrhové sily: $N_{t,Ed} = 326,0 \text{ kN}$ (ťah)

$$N_{c,Ed} = -1520,1 \text{ kN}$$
 (tlak)

Návrh podľa ČSN 73 1401:

Plech: P20 – ø360 mm

Skrutky: 8xM20-8.8

$$F_{1,t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 245}{1,25} = 141,1 \text{ kN}$$

$$t_e = 4,3 \left(\frac{bd^2}{a} \right)^{\frac{1}{3}} = 4,3 \left(\frac{35 \cdot 20^2}{35} \right)^{\frac{1}{3}} = 31,7 \text{ mm} \geq t = 20 \text{ mm} \Rightarrow \text{dochádza k páčeniu}$$

$$\gamma_p = 1 + 0,005 \cdot \frac{t_e^3 - t^3}{d^2} = 1 + 0,005 \cdot \frac{31,7^3 - 20^3}{20^2} = 1,3$$

$$F_{t,Ed} = \frac{1}{8} \cdot \gamma_p \cdot N_{t,Ed} = \frac{1}{8} \cdot 1,3 \cdot 326,0 = 52,9 \text{ kN} \leq F_{1,t,Rd} = 141,1 \text{ kN}$$

⇒ **VYHOVUJE**

Posúdenie hrúbky čelnej dosky

$$M_c = 2 \cdot \frac{1}{8} \cdot F_{t,Ed} \cdot e_c = 2 \cdot \frac{1}{8} \cdot 52,9 \cdot 0,289,1 = 3,82 \text{ kNm}$$

$$b = 2 \cdot w = 2 \cdot \frac{289,1 - 2 \cdot 10}{2} = 269,1 \text{ mm}$$

$$t_{min} = \sqrt{\frac{6 \cdot M_c \cdot \gamma_{M0}}{f_y \cdot b}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 3,82 \cdot 10^6 \cdot 1,0}{355 \cdot 269,15}} = 15,5 \text{ mm} \leq t = 20 \text{ mm}$$

⇒ **VYHOVUJE**

Únosnosť zvaru medzi rúrkou a prírubou

$$a = 4 \text{ mm}$$

$$L = \pi d = \pi \cdot 219,1 = 688 \text{ mm}$$

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \beta_w \gamma_{M2}} = \frac{510}{\sqrt{3} \cdot 0,9 \cdot 1,25} = 261,7 \text{ MPa}$$

$$F_{w,Rd} = L a f_{vw,d} = 688 \cdot 4 \cdot 261,7 \cdot 10^{-3} = 720,5 \text{ kN} \geq F_{Ed} = 326,0 \text{ kN}$$

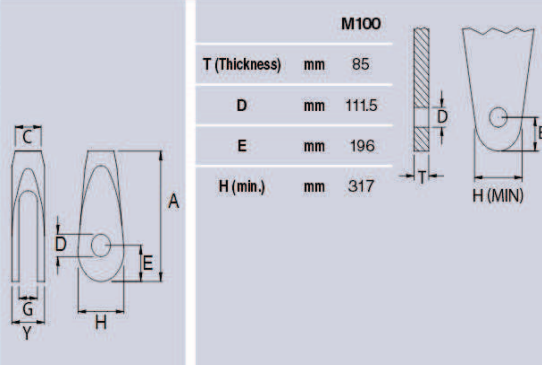
⇒ **VYHOVUJE**

5.5.3 Posúdenie čapového spoja na styku dvoch ťahadiel

Ako už bolo spomínané v predchádzajúcich častiach, prvky vzpínadla tvorí systém ťahadiel Macalloy M100 vrátane všetkých komponentov.

V mieste napojenia na väzník je tyč ťahadla upevnená čapovým spojom do mohutného plechu prerezaného a privareného tupým zvarom k rúrke dolného pásu, k prvej diagonále a prvej zvislici. Na druhom konci sa ťahadlo spája so stredovým ťahadlom a vzperou vzpínadla. Každý z týchto prvkov je pripojený čapovým spojom k spoločnému styčnickovému plechu.

Na posúdenie bol vybraný čapový spoj v mieste spájania dvoch ťahadiel. Rozmerové parametre boli prevzaté z katalógu firmy Macalloy pre systém M100 a materiál s medzou klzu 520 MPa.

Table 14 – Component Dimensions			
Thread	Units	M100	
Fork Ref.	FA/100		
A	mm	555.0	
G	mm	91.0	
C	mm	143.0	
D	mm	111.5	
E	mm	188.0	
Y	mm	174.0	
H	mm	289.0	
			M100
T (Thickness)	mm	85	
D	mm	111.5	
E	mm	196	
H (min.)	mm	317	

Obr. 60 Rozmerové parametre čapového spoja systému ťahadiel Macalloy 520

Návrhové sily

$$F_{Ed} = 1828,2 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{8}(b + 4c + 2a) = \frac{1828,2}{8}(85 + 4 \cdot 3 + 2 \cdot 41,5) \cdot 10^{-3} = 41,1 \text{ kNm}$$

Únosnost čapu v strihu

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 A f_{up}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 111,5^2 \cdot 510}{4 \cdot 1,25} \cdot 10^{-3} = 2390,3 \text{ kN} \geq F_{v,Ed} = 1828,2 \text{ kN}$$

\Rightarrow **VYHOVUJE**

Únosnost plechu a čapu v otláčení

$$t = \min\{2 \cdot 41,5; 85\} = 83 \text{ mm}$$

$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 t d f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1,5 \cdot 83 \cdot 111,5 \cdot 355}{1,0} \cdot 10^{-3} = 4928,0 \text{ kN} \geq F_{b,Ed} = 1828,2 \text{ kN}$$

\Rightarrow **VYHOVUJE**

Únosnost čapu v ohybe

$$W_{el} = \frac{\pi d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 111,5^3}{32} = 136\,089,5 \text{ mm}^3$$

$$M_{Rd} = \frac{1,5 W_{el} f_{yp}}{\gamma_{M0}} = \frac{1,5 \cdot 136\,089,5 \cdot 355}{1,0} \cdot 10^{-6} = 72,5 \text{ kNm} \geq M_{Ed} = 41,1 \text{ kNm}$$

\Rightarrow **VYHOVUJE**

Únosnost čapu při kombinácii strihu a ohybu

$$\left[\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right]^2 + \left[\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \right]^2 = \left[\frac{1828,2}{2390,3} \right]^2 + \left[\frac{41,1}{72,5} \right]^2 = 0,58 + 0,32 = 0,90 \leq 1$$

\Rightarrow **VYHOVUJE**

6 Hlavné body montáže

V tejto kapitole stručne zhrnieme základný postup montáže navrhnutej konštrukcie zastrešenia. Inšpirácia pritom bola čerpaná z dostupných informácií o výstavbe reálnej WERK ARENY v Třinci ([23], [26]).

Výroba väzníkov a stužidiel

Jednotlivé prúty väzníkov i prvky portálových stužidiel sú navrhnuté z uzavretých dutých kruhových za tepla valcovaných prierezov z materiálu S355. Podľa návrhu sú medzipásové prúty väzníkov k priebežným pásom privarené tupým zvarom okolo celého svojho obvodu a dodatočne spevnené výstužnými plechmi klinového tvaru. V každom styčníku horného i dolného pásu sú v zvislej rovine kolmej na väzník privarené styčníkové plechy s predvrtanými dierami, pomocou ktorých sa k nim montážnymi skrutkovými spojmi pripoja prvky portálových stužidiel. Každý styčníkový plech je tvarovo špecifický, nakoľko sa menia uhly, pod ktorými sú k väzníkom pripájané väznice a vzpery portálových stužidiel, kopírujúce guľový tvar strechy.

Výroba väzníkov bude prebiehať vo výrobných halách. Každý väzník bude na stavisko dodaný v troch častiach, kde bude pomocou skrutkovaných prírubových spojov pásov a diagonál zmontovaný do projektovaného stavu. Miesta montážnych spojov sú vyznačené vo výkresovej časti.

Jednotlivé prúty portálových stužidiel budú navzájom spojené tupými zvarmi. Voľné konce prútov budú opatrené styčníkovými plechmi zarezanými a privarenými do koncov rúrok. Väznica a malá vzperka stužidla budú mať spoločný styčníkový plech, pomocou ktorého bude stužidlo na stavbe pripojené štvorskutkovým spojom k hornému pásu väzníka. Hlavná veľká vzpera bude k dolnému pásu pripojená pomocou dvoch skrutiek.

Montáž a manipulácia na stavbe

Každá časť väzníkov bude na stavbu dodaná s finálnym protikoróznym ochranným náterom. Manipulácia s nimi bude preto vyžadovať zvýšenú opatrnosť, aby nedošlo k významnému poškodeniu náteru. Prípadné poškodenia protikoróznej ochrany v menšom rozsahu musia byť po montáži opravené.

Po privezení jednotlivých častí väzníkov na stavbu budú príslušné časti zmontované do projektovaného stavu montážnymi skrutkovými spojmi. Celý väzník bude vyzdvihnutý a osadený na kývne stojky vždy dvojicou žeriavov s dostatočnou únosnosťou a dostupnosťou. Väzník bude pri zdvíhaní uchytený za horný pás v štyroch miestach – symetricky dva a dva závesy z každého žeriavu. Ihneď po osadení väzníka na kývne stojky budú k nemu pripojené ťahadlá, zatiaľ bez predopnutia. Minimalizácia previsu krajných ťahadiel bude zabezpečená systémom laniek z nerezovej ocele upevnených na dolný pás väzníka vždy v tretine dĺžky ťahadla. V prípade osadzovania prvého väzníka bude jeho zvislá po-

loha fixovaná žeriavom (stačí jeden) dovedy, kým k nemu nebude pripevnená konštrukcia previsnutého konca v pozdĺžnom smere haly, spojená priečnym obvodovým stužidlom. Po spojení týchto častí bude väzník dostatočne stabilizovaný na uvoľnenie žeriava. Po osadení druhého väzníka a po zapojení ťahadiel vzpínadla bude jeho poloha opäť dočasne zaistená pomocou žeriava, kým nebude prepojený s prvým väzníkom pomocou prvkov portálového stužidla aspoň v troch bodoch (medzi druhým a tretím poľom priehrady a v strede). Jednotlivé portálové stužidlá budú k väzníkom pripájané montážnymi skrutkovými spojmi. Ich realizácia bude vykonávaná z vysoko zdvižnej montážnej plošiny. Takto sa bude postupovať až po posledný väzník. S pribúdajúcim počtom osadených väzníkov sa zároveň budú montovať aj prvky strešného a obvodového stužidla, nosnej konštrukcie pre videokocku a obslužnej lávky.

Predpínanie

Ťahadlá vzpínadiel sú navrhnuté z konštrukčného systému Macalloy 520. Všetky krajné ťahadlá budú zaistené proti nadmernému previsu vždy dvomi nerezovými lankami upevnenými na dolný pás väzníka. Tieto ťahadlá sú tvorené z dvoch častí, ktoré sú vzájomne spojené závitovou spojkou bez možnosti rektifikácie. Napínaky sú situované bližšie ku koncom ťahadiel pod vzperami. Stredné ťahadlá pod vzperami sú bez napínacích jednotiek.

Predpínanie ťahadiel sa bude realizovať až po zmontovaní celej nosnej konštrukcie strechy. Pred samotným procesom sa pomocou dopredu pripojených tenzometrov (štyri na každé ťahadlo) zmerajú počiatočné sily v ťahadlách od vlastnej tiaže nosnej konštrukcie zastrešenia. Tie sa postupným napínaním jednotlivých ťahadiel prevedú na projektované sily. Celý napínací proces bude neustále monitorovaný, vyhodnocovaný a riadený pod dohľadom zodpovedného projektanta.

Samotné predpínanie bude realizované prostredníctvom napínakových matíc s pomocou pre hydraulické lis. Napnutím každého ťahadla dôjde k zmene vnútorných síl ako v predpätých, tak aj v nepredpätých ťahadlách. Proces napínania bude preto prebiehať v niekoľkých krokoch až po dosiahnutie projektovaného stavu. Za proces napínania je zodpovedný projektant.

Montáž strešného plášťa

Bezprostredne po dokončení predpínania bude na oceľové pásky privarené k väzniciam osadený skladaný strešný plášť z trapézových plechov. Po uložení strešného plášťa budú sily v ťahadlách opäť zmerané a porovnané s projektovanými silami. O prípadných ďalších krokoch rozhodne zodpovedný projektant.

Záver

Táto práca bola venovaná využitiu predpínaného vzpínadla, ktoré sa s obľubou používa ako hlavný nosný prvok zastrešenia hál veľkých rozpätí.

Po teoretickom vstupe do problematiky predpínania v oceľových konštrukciách bola hlavná pozornosť práce zameraná na vplyv veľkosti vnášaného predpätia na prerozdelenie vnútorných síl v jednotlivých prvkoch konštrukcie. Na základe poznatkov získaných z parametrických štúdií rovinného i priestorového pôsobenia predpätia bol vypracovaný konkrétny návrh zastrešenia veľkorozponového objektu. Inšpiráciou pre spracovanie návrhu konštrukcie bolo existujúce zastrešenie WERK ARENY v Trinci, kde môžeme reálne vidieť použitie vzpínadiel s predpätými ťahadlami v úlohe hlavných nosných prvkov strešnej konštrukcie.

Výpočtový model navrhutej konštrukcie bol vytvorený v statickom programe SCIA Engineer 16.1, kde bol zaťažený príslušným zaťažením spočítaným podľa súčasných platných noriem. V práci sú ďalej uvedené ukážky posudkov jednotlivých prútov a vybraných styčníc a spojov. K návrhu bola vypracovaná i prehľadná výkresová dokumentácia a detailné výkresy niektorých styčníc. Na záver je uvedený zjednodušený postup výroby a montáže navrhutej konštrukcie.

V práci boli spracované dve štúdie vplyvu predpätia na konštrukciu. Prvá bola urobená na rovinnom modeli oblúkového priehradového väzníka so vzpínadlom, v druhej bol tento typ väzníka zakomponovaný do priestorového výpočtového modelu.

Pre účely parametrickej štúdie bol základný tvar skúmaného 2D väzníka prepožičaný z priestorového modelu a reprezentoval stredový väzník s najväčším rozpätím 60 m a vzo-pätím 3 m. Pri skúmaní vplyvu predpätia na zmenu vnútorných síl v konštrukcii bol zároveň skúmaný aj vplyv výšky vzpier vzpínadla. Výsledky ukázali, že vo väčšine posudzovaných prútov dosahoval väzník s vyššími vzperami priaznivejšie rozloženie vnútorných síl a menšiu deformovateľnosť konštrukcie. Čo sa týka zväčšovaného počiatočného napätia, tak zjednodušene môžeme skonštatovať, že vyššie predpätie malo pozitívny vplyv na zmenšenie tlakového namáhania iba v prípade horného pása a zvislíc, v dolnom páse, diagonálach a vo vzperách pre návrh rozhodujúce vnútorné tlakové sily narastali. Okrem zvýšenia tuhosti konštrukcie sa v globálnom pohľade významný pozitívny vplyv počiatočného predpínania neprejavil. Do rozhodujúcich prvkov sa vnášalo väčšie tlakové namáhanie, čo by v praxi znamenalo navrhnuť väčšie prierezy, a teda drahšiu konštrukciu.

Druhá parametrická štúdia bola urobená na 3D modeli zastrešenia navrhnutého v podobnom duchu ako WERK ARENA v Trinci. Hlavný nosný prvok v priečnom smere tvoril už spomínaný rovinný priehradový rúrkový väzník so vzpínadlom s predpínanými ťahadlami. Výška vzpier dvoch stredových väzníkov bola 5,0 m, až postupne klesala na 3,0 m v krajných väzníkoch. Jednotlivé väzníky boli medzi sebou spojené portálovými stužidlami, vďaka ktorým je dosiahnuté priestorové spolupôsobenie celej konštrukcie. Pri postupnom

zvážšaní počiatočného predpätia vnášaného do konštrukcie cez napínanie ťahadiel bola zmena vnútorných síl v prútoch väzníkov obdobná ako tá popísaná v 2D štúdií. To znamená, že tlakové sily sa zmenšovali iba u horných pásov a zvislíc. K tomu sa ale pridal pozitívny pokles tlakového namáhania v prvkoch portálových stužidiel, väzníc a prútoch strešného stužidla. V prútoch obvodového stužidla sa počiatočný veľký ťah v nepredpätej konštrukcii postupne zmenšoval a narastal tlak. Faktom ale je, že tento pozitívny trend vývoja vnútorných síl nepokračoval rovnomerne vo všetkých etapách uvažovaného predpätia. Tak napríklad vo väzniciach vo vrcholovej časti konštrukcie sa tento vývoj zastavil na hodnote predpätia 2800 kN, pri väčšom predpätí maximálna tlaková sila opäť vzrástla. Vo veľkých prvkoch portálových stužidiel začalo tlakové namáhanie narastať niekde medzi hodnotami predpätia 1200–1600 kN. U malých prvkov portálových stužidiel sa táto hranica posunula ešte nižšie – na hodnotu 800–1600 kN. Konštantný priaznivý trend vývoja sa ukázal iba na hornom páse a strešnom stužidle, negatívny na vzperách a obvodovom stužidle.

Okrem toho boli ilustratívne urobené dva návrhy konkrétnych prierezov konštrukcie, ktoré boli následne porovnané z hľadiska hmotnosti použitej ocele. Prvý návrh sa týkal konštrukcie, ktorá by bola nepredpätá – na ňu by sa minulo (okrem ťahadiel) približne 116,9 t ocele. Na konštrukciu predpínanú silou 1600 kN by sa minulo 94,7 t, čo je o 22,2 t (19%) menej ako v prvom prípade.

Celkovo možno skonštatovať, že využitie počiatočného predpínania ťahadiel rovinných vzpínadiel, u ktorých je zaistené priestorové spolupôsobenie s ostatnými prvkami konštrukcie, prináša veľké výhody pri finálnom návrhu prierezov. Otázkou, respektíve predmetom ďalšieho skúmania ostáva zistenie optimálnej veľkosti predpínacej sily aplikovanej na každé jedno ťahadlo. Nakoľko samotný proces predpínania je postupný a s napnutím každého ťahadla sa menia sily nie len v tuhých prvkoch konštrukcie, ale aj v ostatných ťahadlách, na stanovenie najoptimálnejších predpínacích síl by bolo treba použiť sofistikovanejšie metódy, ktoré by boli schopné tieto zmeny zaznamenať, spracovať a vyhodnotiť, napr. lineárne programovanie, alebo iné optimalizačné metódy.

Každopádne, predpínanie oceľových konštrukcií má svoje miesto v súčasnom stavebníctve a dovoľm si tvrdiť, že počet konštrukcií realizovaných touto metódou bude s postupom času a rozvojom technológií významne narastať nie len v mostovom, ale aj v pozemnom staviteľstve.

Literatúra

Normy

- [1] ČSN EN 1990 (EUROKÓD). *Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: ČNI, 2004.
- [2] ČSN EN 1991-1-1. *Zatížení konstrukcí: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Praha: ČNI, 2004.
- [3] ČSN EN 1991-1-3. *Zatížení konstrukcí: Zatížení sněhem*. Praha: ČNI, 2005.
- [4] ČSN EN 1991-1-4. *Zatížení konstrukcí: Zatížení větrem*. Praha: ČNI, 2007.
- [5] ČSN EN 1991-1-5. *Zatížení konstrukcí: Zatížení teplotou*. Praha: ČNI, 2005.
- [6] ČSN EN 1993-1-1. *Navrhování ocelových konstrukcí: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČNI, 2006.
- [7] ČSN EN 1993-1-8. *Navrhování ocelových konstrukcí: Navrhování styčníků*. Praha: ČNI, 2006.

Odborná literatúra

- [8] BUJŇÁK, J., FURTAK, K., VIČAN, J. *Navrhovanie konštrukcií podľa Eurokódov*. 1. vydanie. Žilina: EDIS ŽU, 2003. ISBN 80-8070-078-8
- [9] ELIÁŠOVÁ, M., SOKOL, Z. *Ocelové konstrukce. Příklady*. 1. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-003143-8.
- [10] FERJENČÍK, P., TOCHÁČEK, M. *Predpäté kovové konštrukcie*. 1. vydanie. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1966.
- [11] HOLICKÝ, M., MARKOVÁ, J., SÝKORA, M. *Zatížení stavebních konstrukcí. Příručka k ČSN EN 1991*. 1. vydání. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2010. ISBN 978-80-87093-89-4.
- [12] MACHÁČEK, J. A KOL. *Navrhování ocelových konstrukcí. Příručka k ČSN EN 1993-1-1 a ČSN EN 1993-1-8. Navrhování hliníkových konstrukcí. Příručka k ČSN EN 1999-1*. 1. vydání. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2009. ISBN 978-80-87093-86-3.
- [13] MACHÁČEK, J., STUDNIČKA, J. *Ocelové konstrukce 2*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03174-8.
- [14] NAVRÁTIL, A., MUDRA, V., MALÝ, J. *Sportovní stavby*. 1. vydání. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2010. ISBN 978-80-01-04525-1.

- [15] ROTTER, T., STUDNIČKA, J., KUKLÍK, P. *Ocelové a dřevěné konstrukce. Navrhování podle evropských norem*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2006.
- [16] STAVINOHA, D. *Provádění ocelových konstrukcí podle ČSN EN 1990-2*. 1. vydání. Ostrava: Česká asociace ocelových konstrukcí, 2010. ISBN 978-80-904535-3-1.
- [17] STUDNIČKA, J., VOTLUČKA, L. *Ocelové konstrukce pozemních staveb*. 1. vydání. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1992. ISBN 978-80-01-00866-5.
- [18] SZABÓ, J., KOLLÁR, L. *Structural design of cable-suspended roofs*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1984. ISBN 963-05-3154-2.
- [19] WALD, F. A KOL. *Základy navrhování ocelových konstrukcí podle ČSN EN 1993-1-1 a ČSN EN 1993-1-8*. 1. vydání. Ostrava: Česká asociace ocelových konstrukcí, 2010. ISBN 978-80-904535-0-0.
- [20] WALD, F., SOKOL, Z. *Navrhování styčníků*. 1. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-02073-8.

Internetové zdroje

- [21] Excon. *Sazka Aréna* [online]. Dátum poslednej revízie nezistený [citované 20. 9. 2016]. Dostupné z <http://www.excon.cz/cs/realizace-staveb/sazka-arena>.
- [22] Excon. *Werk Aréna Třinec, ocelová konstrukce a zastřešení* [online]. Dátum poslednej revízie nezistený [citované 20. 9. 2016]. Dostupné z <http://www.excon.cz/cs/realizace-staveb/WerkArénaTřinec>.
- [23] Janata, V., Beran. J. *Návrh ocelové konstrukce zastřešení WERK ARENY* [online], Konstrukce – odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství. Dátum poslednej revízie 20. 2. 2014 [citované 30. 10. 2016]. Dostupné z <http://www.konstrukce.cz/clanek/navrh-ocelove-konstrukce-zastreseni-werk-areny/>.
- [24] Příspěvatelé wikipedie. *Millenium Dome* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie, 2016, dátum poslednej revízie 8. 9. 2016 [citované 19. 9. 2016]. Dostupné z https://cs.wikipedia.org/wiki/Millennium_Dome.
- [25] Příspěvatelé wikipedie. *Vzpínadlo* [online]. Wikipedie: Otevřená encyklopedie, 2016, datum poslední revize 20. 7. 2013 [citováno 22. 9. 2016]. Dostupné z <https://cs.wikipedia.org/wiki/Vzpínadlo>.
- [26] Schlossbauer, J. *Realizace dodávky systémů konstrukčních táhel Macalloy 520 pro akci WERK ARENA Třinec* [online], Konstrukce – odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství. Dátum poslednej revízie 3. 1. 2014

- [citované 23.11.2016]. Dostupné z <http://www.konstrukce.cz/clanek/realizace-dodavky-systemu-konstrukcnich-tahel-macalloy-520-pro-akci-werk-arena-trinec/>.
- [27] SCIA Engineer 16.1. *Nápověda pro SCIA Engineer 16.1* [online]. Dátum poslednej revízie neznámy [citované 9.11.2016]. Dostupné z http://help.scia.net/16.1/cs/index.htm#rb/modeldata/initial_stress.htm.
- [28] Statistics Tools. *Statické tabulky* [online]. Dátum poslednej revízie neznámy [citované 23.4.2015]. Dostupné z <http://www.staticstools.eu/index.php?lang=SK>.
- [29] StavbaWEB. *Komenského most v Jaroměři* [online]. Dátum poslednej revízie 3.2.2016 [citované 20.9.2016]. Dostupné z <https://stavbaweb.dumabyt.cz/komenskeho-most-v-jaromi-13577/clanek.html>.
- [30] StavbaWEB. *Ocelové konstrukce na budově nového ústředí ČSOB* [online]. Dátum poslednej revízie nezistený [citované 20.9.2016]. Dostupné z <https://stavbaweb.dumabyt.cz/ocelove-konstrukce-na-budov-noveho-ustedi-sob-2569/clanek.html>.
- [31] Stavebnictvi3000. *Lávka pro pěší a cyklisty přes Orlici v Hradci Králové* [online]. Dátum poslednej revízie 16.4.2013 [citované 20.9.2016]. Dostupné z <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/lavka-pro-pesi-a-cyklisty-pres-orlici-v-hradci-kralove/>.
- [32] Tension Systems. *Dokumentace k stažení* [online]. Dátum poslednej revízie nezistený [citované 22.11.2016]. Dostupné z http://www.tension.cz/www/media/files/dwg_29/Vypoctove-unosnosti-Macalloy_107.pdf.
- [33] WERK ARENA Třinec. *Základí informace* [online]. Dátum poslednej revízie nezistený [citované 30.10.2016]. Dostupné z <http://werkarena.cz/zakladni-informace/>.

Zoznam príloh

Príloha č. 1: Výkres č. 1 – Pôdorys **Príloha č. 2: Výkres č. 2 – Priečny rez,
Pozdĺžny rez**

Príloha č. 3: Výkres č. 3 – Vybrané styčníky